



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VLIV TYPU ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE NA CHOVÁNÍ
BETONOVÝCH DESEK**

THE INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF FIBER-REINFORCEMENT ON THE BEHAVIOR
OF CONCRETE SLABS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Wünsche

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Dominik Wünsche
Název	Vliv typu rozptýlené výztuže na chování betonových desek
Vedoucí práce	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Neville, A. M.: Properties of concrete.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Processes.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Neville, A. M.; Brooks, J. J.: Concrete technology.

Collepari, M.: Moderní beton.

De Schutter, G.; Bartos, P. J., M.; Domone, P.; Gibbs, J.; Hela, R.: Samozhutnitelný beton.

TP FC 1-1 Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1: Zkoušení vláknobetonu, vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagram vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí.

Odborné tuzemské i zahraniční příspěvky pojednávající o zadané problematice.

Všechny toho času platné normy, zejména s přihlédnutím k normám ČSN EN 206, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN ISO 1920-10, k řadě ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Teoretická část: rešerše pramenů – ve zkratce základní informace o betonu, podrobněji rozebrat problematiku samozhutnitelných betonů, vláknobetonů a typů a druhů používaných. Dále popsat vlastnosti vláknobetonu (především pevnost v tahu ohybem) a možnosti jejich stanovení.

Praktická část: zpracování plánu experimentu – sledování vlivu vláken na chování desek

ze samozhutnitelného betonu. V práci budou použity maximálně dva typy vláken určených do betonu.

Provedení zkoušek za účelem stanovení základních charakteristik použitého betonu, dále provedení zatěžovacích zkoušek desek s různým typem zatížení (např. tříbodová zkouška, čtyřbodová zkouška apod.). Dále zpracování výsledků zkoušek, jejich vyhodnocení a formulace vyplývajících závěrů.

Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou betonu, konkrétně samozhutnitelného betonu, vláknobetonu a jiných druhů používaných betonů. Práce se skládá ze dvou částí, a to teoretické, která se bude zabývat vlastnostmi uvedených betonů, a dále popisem jednotlivých zkušebních metod použitých v praktické části, kterými jsou ultrazvuková impulzní metoda, rezonanční metoda, určení statického modulu pružnosti, pevnosti v tlaku, a především pevností v tahu ohybem. Druhou částí je část praktická zpracovaná formou experimentu. V experimentální části půjde především o provedení zatěžovacích zkoušek desek ze samozhutnitelného betonu a betonu s přidáním ocelových vláken. Následně se stanoví vybrané charakteristiky betonů a vyhodnotí se celý experiment.

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the issue of concrete, specifically self-compacting concrete, fiber concrete and other types of concrete used. The work consists of two parts, the theoretical one, which will deal with the properties of the concrete. It describes the individual test methods used in the practical part. The test methods are the ultrasonic pulse method, the resonance method, the static modulus of elasticity, the compressive strength, and especially flexural strength. The second part is a practical part, which is processed by an experiment. In the experimental part, it will be mainly about carrying out tests of self-compacting concrete slabs and concrete with the addition of steel fibers. Subsequently, selected characteristics of concrete are determined and the whole experiment is evaluated.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, vláknobeton, samozhutnitelný beton, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, modul pružnosti, ultrazvuková impulzová metoda, rezonanční metoda

KEYWORDS

Concrete, fiber concrete, self-compacting concrete, compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity, ultrasonic pulse method, resonance method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

WÜNSCHE, Dominik. *Vliv typu rozptýlené výztuže na chování betonových desek*. Brno, 2019. 62 s., 10 s. příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv typu rozptýlené výztuže na chování betonových desek* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2019

Dominik Wünsche

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv typu rozptýlené výztuže na chování betonových desek* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2019

Dominik Wünsche

autor práce

Poděkování

V následujících řádcích bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D., za poskytnutí studijních materiálů, odborných rad a za pomoc při zpracování praktické části práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Svoboda a syn, s.r.o. za možnost výroby zkušebních těles k praktické části v jejich areálu za dohledu technologa Ing. Martina Lišovského. Poděkování patří dále Ing. Petru Žíttovi za pomoc při zkoušení desek ohybem. Významnou roli v mém vysokoškolském studiu sehrávají také rodiče, kterým bych chtěl touto cestou taktéž poděkovat.

Tato bakalářská práce byla částečně zpracována v rámci řešení projektu č. FV30247 „Vývoj a ověření technologie urychleného předmáčení lehkého umělého kameniva v praktických podmínkách při výrobě lehkého konstrukčního transportbetonu“, podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.

Obsah

1	Úvod	12
2	Cíle práce	13
3	Teoretická část	14
3.1	Beton	14
3.1.1	Cement	14
3.1.2	Kamenivo	15
3.1.3	Příměsi	16
3.1.4	Chemické přísady	16
3.1.5	Zpracovatelnost čerstvého betonu	17
3.1.6	Mechanické vlastnosti betonu	17
3.2	Samozhutnitelný beton SCC (Self-Compacting Concrete)	18
3.2.1	Historie SCC	18
3.2.2	Složky SCC	19
3.2.3	Reologie	19
3.2.4	Vlastnosti čerstvého SCC	20
3.2.4.1	Schopnost vyplňovat bednění	20
3.2.4.2	Prostupnost	20
3.2.4.3	Odolnost proti rozměšování	21
3.2.4.4	Rychlost roztečení	21
3.2.4.5	Čerpatelnost	21
3.2.4.6	Pohledovost povrchů	21
3.2.4.7	Samonivelace	21
3.2.4.8	Odolnost proti rozplavování	21
3.2.5	Mechanické vlastnosti SCC	21
3.2.5.1	Pevnost v tlaku	22
3.2.5.2	Statický modul pružnosti a houževnatost	22
3.2.5.3	Pevnost v tahu	23
3.2.5.4	Dotvarování a smršťování	23

3.3	Vláknobeton	24
3.3.1	Složky drátkobetonu.....	24
3.3.2	Vlastnosti drátkobetonu.....	24
3.3.3	Použití drátkobetonu.....	25
3.4	Obecně o vybraných charakteristikách a jejich stanovení	26
3.4.1	Stanovení pevnosti betonu v tlaku.....	26
3.4.2	Stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem	27
3.4.3	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	28
3.4.4	Ultrazvuková impulzová metoda.....	29
3.4.5	Rezonanční metoda zkoušení betonu [17]	30
4	Praktická část.....	34
4.1	Výroba a ošetření zkušebních těles.....	34
4.1.1	Vstupní suroviny pro výrobu	34
4.1.2	Výroba betonů	35
4.1.3	Zkušební tělesa	35
4.1.4	Odbednění a ošetření těles	36
4.2	Stanovení vybraných charakteristik trámců	37
4.2.1	Stanovení pružných a přetvárných charakteristik trámců	37
4.2.1.1	Ultrazvuková impulzová metoda	37
4.2.1.2	Rezonanční metoda.....	38
4.2.1.3	Měření pomocí cyklického zatěžování a odtěžování.....	39
4.2.1.4	Diskuze pružných a přetvárných charakteristik	40
4.2.2	Stanovení vybraných pevnostních charakteristik betonu	42
4.2.2.1	Pevnost betonu v tahu ohybem	42
4.2.2.2	Pevnosti betonu v tlaku.....	43
4.2.2.3	Diskuze pevnostních zkoušek.....	44
4.3	Stanovení vybrané charakteristiky desek.....	45
4.3.1	Zatížení bodem na střed.....	46

4.3.2	Zatížení linií na střed.....	49
4.3.3	Zatížení kruhovou deskou na střed	51
4.3.4	Diskuze provedených typů zatížení desek.....	54
5	Závěr	56
6	Seznam použitých zdrojů.....	57
6.1	Literatura	57
6.2	Použité obrázky	59
6.3	Použité tabulky	60
6.4	Použité grafy.....	60
7	Seznam symbolů.....	61
8	Seznam příloh	62

1 Úvod

Beton je jeden z nejstarších stavebních materiálů a zároveň v současnosti patří k nepoužívanějším materiálům. Skládá se ze dvou hlavních složek, kterými jsou kamenivo a cementová matrice, která obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva. Kamenivo musí být složeno vždy minimálně ze dvou frakcí, např. šterku a písku. Právě tato kombinace zajistí správné obalení kameniva a vyplnění pórů mezi kamenivem cementovou matricí, čímž vznikne kvalitní beton. Cementová matrice se skládá z vody a cementu. Rozeznáváme několik druhů cementu, z nichž nejznámější je cement portlandský [1].

V posledních letech došlo k technologickým změnám čerstvého betonu za účelem zlepšení jeho vlastností. Jedním z důvodů těchto změn bylo vytvoření betonu, který nebylo potřeba na stavbě dále hutnit pomocí vibračních přístrojů, a tím zrychlit ukládání čerstvého betonu do bednění. Na konci 80. let minulého století došlo k vývojem plastifikačních přísad, které umožňují zvýšit tekutost čerstvého betonu, a tak díky těmto přísadám vznikl samozhutnitelný beton (SCC neboli Self-Compacting Concrete). K další inovaci betonu došlo použitím vláken, která zlepšují vlastnosti betonu. Vláknem ovlivňují vytváření trhlin vznikajících díky tahovému napětí, které je vyvoláno např. smršťováním betonu. Dále zvyšují rázovou pevnost a odolnost proti abrazi [1], [2].

Nejvýznamnějšími mechanickými vlastnostmi betonu je pevnost v tlaku, pevnosti betonu v tahu, která se dělí na pevnost v prostém tahu, v tahu ohybem a v příčném tahu. Za základní přetvárnostní charakteristiku betonu je považován modul pružnosti, který ovlivňuje průhyby, dotvarování a vznik trhlin v betonu [3].

2 Cíle práce

Cílem práce je porovnat vybrané charakteristiky samozhutnitelného betonu bez vláken a s vlákny. V teoretické části se práce zabývá vybranými charakteristikami a možnosti jejich stanovení pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek. Praktická část se bude zabývat konkrétními typy zkoušek, které byly provedeny v laboratoři ústavu stavebního zkušebnictví, stanovením vybraných charakteristik a jejich vyhodnocením. Použití vláken v betonu ovlivňuje jeho charakteristiky, především zvyšuje tahovou pevnost betonu. Proto bude důležitá zkouška pevnosti betonu v tahu ohybem různými typy zatížení (např. tříbodová zkouška).

Experiment bude probíhat na betonových deskách o rozměrech 300 x 50 x 900 mm, a proto se práce bude zabývat převážně vlivem typu rozptýlené výztuže na chování betonových desek.

3 Teoretická část

3.1 Beton

Beton je v současnosti základním stavebním materiálem. Jedná se o kompozitní materiál, skládá se tedy z více složek. Mezi základní složky betonu patří kamenivo, cement a voda. Do čerstvého betonu se mohou přidávat přísady, příměsi a různá vlákna, která ovlivňují charakteristiky betonu. Cement s přídavkem vody tvoří matici, která snadno mění tvar, a která postupně, zhruba za hodinu přestává být tvárná (nastává tak proces tuhnutí) a může získat texturu přírodního kamene (proces tvrdnutí). Proces tuhnutí se dá ovlivnit přidáním síranu vápenatého (tzv. regulátor tuhnutí). Cement může dále obsahovat např. přírodní pucolán, vápenec, popílek nebo vysokopecní strusku a podle toho se určuje, o který cement se jedná [1].

Základní složky betonu jsou portlandský cement, voda a kamenivo, které se skládá vždy minimálně ze dvou frakcí, např. písku a přírodního štěrku nebo drtě. Samotný tvar kameniva má vliv na výsledné charakteristiky betonu. Přírodní štěrk má pravidelná oblá zrna a hladký povrch, zatímco drť má nepravidelná a hrubá zrna. Beton se rozděluje na čerstvý beton a ztvrdlý beton. Čerstvý beton má vlastnosti plastického materiálu a vzniká smícháním složek, ztvrdlý beton má již určitou pevnost a je v pevném stavu [1].

V dnešní době jsou všechny složky betonu dostupné, a tak má možnost kdokoli vytvořit doma beton, ale je veliký rozdíl mezi kvalitním a nekvalitním betonem. V domácích podmínkách se jedná především o méně kvalitní beton, který je míchan v nevhodném poměru složek, beton tedy nevykazuje stejné vlastnosti jako beton vyrobený v betonárnách. Poměr mezi kamenivem a cementovou maticí je velice důležitý, protože ovlivňuje výsledné vlastnosti. Např. méně kameniva a více matrice přispívá k lepší zpracovatelnosti, ale zvyšuje náklonnost ke vzniku trhlin vlivem teplotních napětí, která jsou důsledkem hydratačního tepla a vlivem většího smrštění v suchém prostředí [1] [3] [4].

3.1.1 Cement

Cement je složka, bez které nelze beton vyrobit. Jeho smícháním s vodou vzniká plastická hmota (pasta), která po několika hodinách tuhne, a tím ztrácí plasticitu. Po tuhnutí nastává proces tvrdnutí, který dává betonu vlastnosti podobné přírodnímu kameni. Kvalitu a vlastnosti betonu ovlivňuje především tzv. vodní součinitel, který určuje poměr mezi vodou a cementem [1] [4]:

$$w = \frac{v}{c} \quad (1)$$

Kde: w je vodní součinitel [-]

v je množství vody v čerstvém betonu [kg]

c je množství cementu v čerstvém betonu [kg]

Vysoký vodní součinitel snižuje pevnost a trvanlivost betonu, pokud je nutné zlepšit zpracovatelnost čerstvého betonu, přidá se voda s cementem ve stejném poměru, a tím nedojde k zásadní změně vlastností betonu. Zpracovatelnost dále ovlivňují plastifikátory a superplastifikátory.

Cement se dodává v několika pevnostních třídách a to: 32,5; 42,5; 52,5. Čísla udávají minimální tlakovou pevnost malty ve stáří 28 dní v MPa. Rozeznáváme 5 typů cementů, kterými jsou [1]:

- Typ I: Portlandský cement – obecné použití
- Typ II: Směsný portlandský cement – pro betony v kontaktu se zeminami s vysokým obsahem síranů
- Typ III: Vysokopecní cement – vhodný na masivní konstrukce díky nízkému hydratačnímu teplu
- Typ IV: Pucolánový cement
- Typ V: Směsný cement – s průměrnou odolností proti síranům

3.1.2 Kamenivo

Kamenivo tvoří v betonu zhruba dvě třetiny až tři čtvrtiny objemu, a proto je jednou z hlavních složek betonu. Jeho cena je nižší než cementu, a tak snižuje cenu betonu. Kamenivo se dělí na tři základní druhy, kterými jsou přírodní těžené nebo drcené, umělé a recyklované. Těžené má většinou oblá zrna, která jsou vhodná pro použití betonu namáhaného tlakem. Drcené kamenivo má zrna nepravidelná, a proto se hodí díky své lepší soudržnosti s cementovou matricí pro namáhání i jinými způsoby než tlakem. Podle velikosti zrn se dělí kamenivo na jemné (<0,063 mm), drobné kamenivo (0,063 – 4 mm) a hrubé kamenivo (4–63 mm). Kamenivo může obsahovat i škodlivé látky, které ovlivňují trvanlivost betonu. Mezi tyto škodlivé látky patří sírany, chloridy, reaktivní silika a organické látky [1] [5].

Ideální poměr mezi frakcemi kameniva určuje tzv. křivka zrnitosti. Rozeznáváme dva typy křivek, kterými jsou Füllerova a Bolomeyova (Obr. 1). Füllerova křivka pomáhá k dosažení nejvyšší hutnosti betonu, která způsobuje to, že beton bude hůře zpracovatelný, a proto se používá pro čerstvý beton, u kterého je požadována nízká zpracovatelnost. Křivka je vyjádřena Füller-Thomsonovým vztahem [1]:

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Kde: P je propad sítem o velikosti otvoru d

D_{max} je velikost maximálního zrna kameniva

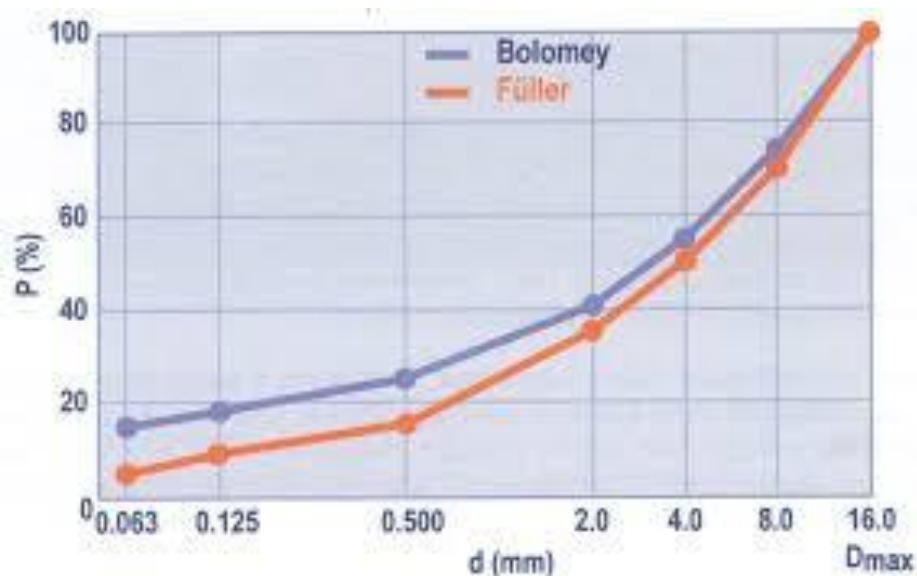
Z důvodu požadované zpracovatelnosti navrhl Bolomey modifikace ideální křivky zrnitosti za použití součinitele A , který znázorňuje požadovanou zpracovatelnost čerstvého betonu. Součinitel A nabývá hodnot 8–14 podle požadované konzistence betonu (S1 – S5). Bolomeyova křivka je vyjádřena rovnicí [1]:

$$P = A + (100 - A) \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Kde: P je propad sítem o velikosti otvoru d

D_{max} je velikost maximálního zrna kameniva

A je součinitel požadované zpracovatelnosti



Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Fülleroovy rovnice [1]

3.1.3 Příměsi

Příměsi jsou většinou práškovité látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Dělí se na dva typy [6]:

- Typ I – téměř inertní
- Typ II – pucolánové nebo latentně hydraulické

Výhody příměsí obecně spočívají v následujícím [2]:

- Regulace pevnosti, zejména v případech, kde není požadována vysoká pevnost, které by bylo dosaženo užitím pouze portlandského cementu bez příměsí
- Snížení hydratačního tepla, z čehož plyne i snížení rizika vzniku trhlin v důsledku tepelného namáhání
- Snížení rizika poškození betonu vlivem alkalicko-křemičité reakce následkem vysokého obsahu alkálií v cementu
- Zlepšení stability a reologického chování čerstvého betonu
- Prodloužení zpracovatelnosti i při vyšších teplotách
- Zásadní snížení ceny betonu

3.1.4 Chemické přísady

Do betonu se dále přidávají kromě základních složek také chemické přísady, které se přidávají před, anebo v průběhu míchání betonu. Oproti minerálním příměsím se přidávají v relativně malém množství (cca 0,1 – 10 kg / m³). Přísady zlepšují vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Rozeznáváme několik kategorií [1]:

- Urychlující přísady – tuhnutí, tvrdnutí
- Zpomalující přísady
- Provzdušňovací přísady
- Inhibitory koroze

- Inhibitory alkalicko-křemičité reakce
- Přísady modifikující viskozitu betonu
- Hydrofobizační přísady
- Přísady zamezující smršťování betonu
- Přísady snižující obsah vody
- Superplastifikátory, neboli přísady silně snižující obsah vody

3.1.5 Zpracovatelnost čerstvého betonu

Zpracovatelnost je schopnost betonu se pohybovat a být zhutňován. Pohyblivost čerstvého betonu je důležitá především pro dopravu, čerpání a uložení betonu do bednění. Schopnost zhutnění betonu je jednou z nejdůležitějších vlastností, protože pomůže dostat z čerstvého betonu nadbytečný vzduch, který by zvyšoval množství pórů, a tak snižoval celkovou pevnost. Zpracovatelnost se měří několika způsoby, tím nejznámějším je sednutí kužele pomocí Abramsova kužele s výškou 300 mm, kdy se kužel naplní čerstvým betonem, následně se kužel odebere a měří se pokles výšky betonového vzorku. Díky poklesu čerstvého betonu můžeme určit stupeň konzistence. Stupeň se označuje písmenem S a číslem od 1 do 5, čím vyšší číslo, tím tekutější beton. Další metodou měření zpracovatelnosti je zkouška VeBe, zkouška rozlití a stupeň zhutnitelnosti [1] [6] [7].

Zkoušky zpracovatelnosti samozhutnitelného betonu, kterým se práce zabývá v praktické části, jsou uvedeny v normách ČSN EN 12350-8: Zkouška sednutí-rozlitím [8], ČSN EN 12350-9: Zkouška V-nálevkou [9], ČSN EN 12350-10: Zkouška L-truhlíkem [10], ČSN EN 12350-11: Zkouška segregace při prosévání [11], ČSN EN 12350-12: Zkouška J-kroužkem [12].

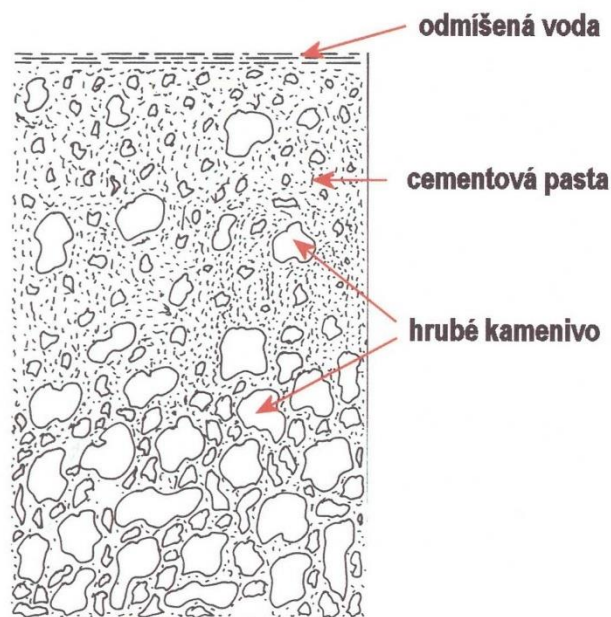
3.1.6 Mechanické vlastnosti betonu

Nejvýznamnější vlastností betonu je nepochybně jeho pevnost v tlaku (f_c), která odpovídá maximálnímu napětí (σ_c), které je beton schopen přenést. Beton může být namáhán tlakovým napětím (σ_c), tahovým napětím (σ_t) a ohybovým napětím (σ_f). Podle toho, jakým způsobem je beton namáhán, dělí se také druhy pevnosti, a to tlakovou (f_c), tahovou (f_t), v příčném tahu (f_{ct}) a v tahu ohybem (f_f). Obecně prostý beton má velmi dobrou pevnost v tlaku, ale v tahu už takovému namáhání neodolává, a tak jeho tahová nebo ohybová pevnost je výrazně nižší. Z tohoto důvodu se do betonu vkládá betonářská výztuž, která přenáší toto namáhání mnohem lépe, a hovoří se tedy o vyztuženém betonu neboli železobetonu [1] [3] [4].

V experimentální části práce se budou provádět zatěžovací zkoušky pevnosti betonu v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 [13], pevnost betonu v tahu ohybem dle normy ČSN EN 12390-5 [14], stanovení statického modulu pružnosti v tlaku dle normy ČSN ISO 1920-10 [15] a déle nedestruktivní zkoušky betonu dle normy ČSN 73 1371 [16] a ČSN 73 1372 [17]. Tyto zkoušky budou dále popsány podrobněji v dalších kapitolách.

3.2 Samozhutnitelný beton SCC (Self-Compacting Concrete)

Samozhutnitelný beton, jak už název sám o sobě napovídá, je beton, který není potřeba dále hutnit pomocí vibrátorů. Díky jeho složení beton vykazuje mnohem vyšší zpracovatelnost čerstvého betonu za použití menšího množství vody s přidáním plastifikátorů, které způsobují ztekucení a stabilnější chování betonu. Zároveň se nesmí plést SCC a tradiční beton s vysokou mírou zpracovatelnosti tzn. litý beton. Na rozdíl od litého betonu, který sice není třeba zhutňovat, beton samozhutnitelný odolává segregaci. Segregace je jev, kdy větší zrna kameniva klesnou a vytlačují zrna menší na povrch, s menšími zrny se k povrchu dostává i cementová pasta a odmišená voda v čerstvém betonu (Obr. 2).



Obr. 2 Znázornění segregace betonu [1]

Ztvrdlý samozhutnitelný beton může mít mnoho rozdílných vlastností, které ovlivňuje samotné složení betonu. Beton může mít vysokou či nízkou pevnost v tlaku nebo také nízkou až extrémně vysokou trvanlivost [2].

3.2.1 Historie SCC

Pojem „samozhutnitelnost“ je mnohem starší než „moderní SCC“. Poprvé zazněla myšlenka samozhutnitelnosti při podvodních stavbách v šedesátých letech dvacátého století, kdy betony byly založeny na vysokém vodním součiniteli a velkém obsahu cementu, ovšem tyto betony nevykazovaly dostatečné vlastnosti ztvrdlého betonu. Tyto betony se používaly především při betonáži pod vodou, vytváření hlubinných pilot, kde je zhutňování betonu téměř nemožné, ale hutnost byla při těchto recepturách potřeba.

O moderním SCC se začalo mluvit v Japonsku, kdy se z důvodů poválečných rekonstrukcí stavělo velice rychle, a budovy po jedné až dvou desítkách let padaly. To zapříčinilo start projektu, kdy se zkoumal důvod, proč budovy padají. Příčinu zjistil H. Okamura z Tokijské univerzity, kterou bylo nedostatečné zhutnění betonu. Díky tomuto zjištění členové výzkumného týmu přišli s návrhem betonu, který nebude třeba dále zhutňovat, a zvýší se jeho zpracovatelnost. Začátkem devadesátých let dvacátého století byl tedy použit poprvé moderní SCC na významných praktických stavbách, kde

prokazatelně zvýšil kvalitu a trvanlivost betonu. Další výzkum probíhal ve Skotsku pod vedením P. J. M. Bartose a v Kanadě K. H. Khayatem, kteří se zabývali příměsemi. Výzkum dal za vznik samozhutnitelného čerstvého betonu s přidáním superplastifikátoru, který snížil vymývání a umožnil betonáž pod vodou. Tohle vedlo k použití méně cementu, než bylo běžné u podvodních betonáží. Tato receptura byla vhodná i pro použití při běžných betonážích, protože čerstvý beton byl dostatečně tekutý, a bylo možné jej ukládat bez zhutňování. Kvůli specifitějším určení výrobních metod a klíčových vlastností speciálních a vysokohodnotných betonů byl v tomto období založen mezinárodní výbor RILEM, který vytvořil P. J. M. Bartos. V roce 1992 byla po vedením P. J. M. Bartose sestavena nová technická komise TC145-WSM (později TC145-SCC), která v roce 2000 zveřejnila první směrnice pro SCC. [2].

3.2.2 Složky SCC

Samozhutnitelný beton se vyrábí ze stejných složek jako klasický konstrukční beton. Tyto betony jsou velice citlivé vůči obměnám dodávaného materiálu, a i kvalitativním změnám stejného materiálu než tradiční vibrovaný beton (TVC), proto je důležité dodržet jednotnost a konzistentnost dodávek jednotlivých složek při výrobě betonu.

Kamenivo pro SCC se nejčastěji používá drcené lomové, ale lze použít i expandované přírodní jíly pro výrobu lehkých betonů. Ve většině případů se používá kamenivo s velikostí zrn 16–22 mm díky jejich dostupnosti a zaběhlé praxi. Kamenivo menších průměrů se používá na výrobu tenkých prefabrikátů z SCC. Poměr velikosti zrn se v receptuře betonu určuje pomocí tzv. granulometrie dílčích frakcí kameniva. Do betonu je možné použít i drobné částice, které nesmí obsahovat jílové příměsi a odplavitelné podíly, ty totiž ovlivňují ztrátu pohyblivosti čerstvého betonu.

Pro výrobu samozhutnitelného betonu se používají portlandské cementy s nízkým obsahem belitu a nízkým vývinem hydratačního tepla. Běžně se ale používají klasické portlandské cementy s příměsemi mletého vápence, kamenné odprašky, granulovaná vysokopecní struska, popílek nebo mikrosilika.

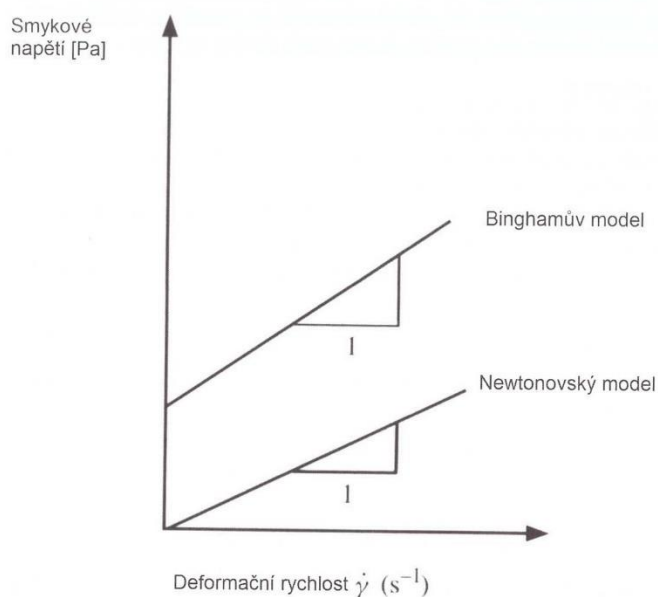
Nezbytnou součástí SCC je použití superplastifikátoru, který způsobuje tekutost čerstvého betonu, což ulehčuje práci ve výstavbě monolitických i prefabrikovaných konstrukcí. Z počátku se používaly méně účinné přísady na základě melamin-formaldehydu a naftalen-formaldehydu, které způsobovaly kratší dobu zpracovatelnosti a krvácení betonu. Později se začaly používat přísady na bázi polykarboxylátu, který vedl k vyššímu účinku ztekucení a stabilnějšímu chování čerstvého SCC [2] [18].

3.2.3 Reologie

Reologie je odvětví vědy, zabývající se deformací a tokem hmoty. Její původní název byl ve starořečtině, odkazující *panta rei*, vše plyne. Zabývá se betonem v čerstvém i zatvrdlém stavu se všemi přechodovými stádii zrání a vývoje betonu. U SCC se zabývá primárně chováním čerstvého betonu. Pozorováním kapaliny se zjistí, zda smyková rychlost je lineární funkcí tečného napětí, jde o newtonovskou kapalinu, anebo linearita neplatí a jedná se o nenewtonovské (Binghamské) kapaliny.

Při reologii se čerstvý beton považuje za vícefázový materiál, jde o disperzi pevných částic (kameniva) ve viskózní kapalině, kterou představuje cementová pasta. Samotná pasta je vícefázovým materiálem, skládající se z částic cementu stejné velikosti jako příměsi suspendované ve vodě. Reologie předpokládá homogenitu a vzájemné spolupůsobení těchto fází. Kamenivo zabírá zhruba 80 % objemu,

a cementová pasta, která odděluje a obaluje zrna kameniva, vytváří tzv. „lubrikační“ vrstvu, která snižuje tření mezi zrny a usnadňuje pohyb a přeskupování. Při reologii SCC dochází použitím superplastifikátorů k vytvoření opačných nábojů na povrchu zrn cementu a jemných částí, tedy voda volně putuje mezi zrny a dojde k ztekucení čerstvého betonu, kdy se hovoří o newtonovském tečení. Na rozdíl od tradičních betonů, kde se nepoužívají plastifikační přísady, dojde k shluknutí zrn cementu a jemných podílů, což zabrání volnému putování vody mezi zrny, je tedy nutné vynaložit další energii k ztekucení čerstvého betonu, a hovoří se tedy o nenewtonovském tečení. Rozdíl mezi chováním newtonovských a nenewtonovských kapalin ukazuje Obr. 3 [2] [19].



Obr. 3 Diagram tečení Newtonovské a Binghamské viskózní kapaliny [2]

3.2.4 Vlastnosti čerstvého SCC

Hlavní odlišnou vlastností SCC od tradičního betonu je jeho tekutost, ze které se dále odvíjejí tři základní vlastnosti SCC, kterými jsou schopnost vyplňování bednění, prostupnost, odolnost proti rozměšování a sedimentaci, dalšími vlastnostmi jsou rychlost tečení, čerpatelnost, pohledovost povrchů, samonivelace a odolnost proti rozplavování [2] [18].

3.2.4.1 Schopnost vyplňovat bednění

Tato schopnost ukazuje, jak daleko by mohl čerstvý SCC dotéci vlivem vlastní tíhy a do jaké míry by vyplnil bednění a prostory s různou mírou složitosti. Často se nazývá také „tečení“ nebo „tekutost“. Schopnost musí být dostatečně vysoká, aby čerstvý beton byl dostatečně tekutý, a mohl tak uniknout vzduch vnesený do betonu při míchání nebo zachycený během ukládání, a na jeho místě zůstal dostatečně zhutněný beton [2] [19].

3.2.4.2 Prostupnost

Prostupností se určuje, jak snadno čerstvý beton protéká stísněnými a zúženými prostory, úzkými otvory a pruty výztuže. Při toku čerstvého betonu může dojít k zaklínění větších zrn kameniva, které dále brání rozlití betonu, např. mezi prvky výztuže, z toho důvodu se určuje propustnost, která pomáhá ke stanovení tohoto rizika. Má-li beton procházet mezi prvky výztuže, musí částice hrubého kameniva přeskočit svoji polohu v čerstvém betonu, zachovat stupeň odloučení a nesmí se shlukovat, vzájemně

provazovat a blokovat otvory. Čerstvý beton musí mít dostatečnou míru propustnosti a schopnost vyplnění [2] [19].

3.2.4.3 Odolnost proti rozměšování

Je to jev vztahující se k plastické viskozitě a hustotě cementové pasty. Tento jev popisuje to, že pevná hustší látka než kapalina, má tendenci klesat, a viskózní kapalina obtéká tuhá tělesa obtížně. Jev se nazývá segregace betonu. Požadavkem betonových konstrukcí je homogenita prvků, a proto je důležité segregaci zabránit. Nejčastěji k segregaci dojde při plnění bednění z velké výšky, kdy hrubé kamenivo sedne ke dnu a cementovou pastu vytlačí na povrch. Segregace se projeví až po odbednění, kde se v prvku ukazuje vysoké množství nepravidelných pórů na povrchu betonu. Další možností segregace je krvácení a rozmíšení vlivem čerpacího tlaku, ke kterému dojde, když se voda oddělí od čerstvého betonu, a v průběhu ukládání stoupá k povrchu litého prvku, kde vzniká vrstvička pasty s vysokým vodním součinitelem. Problematiku krvácení lze odstranit u SCC vhodným složením betonu. Důležitý je vhodný poměr záměsové vody a plastifikační přísady. SCC s příměsí mletého vápence lépe odolává krvácení, protože vápenec na sebe v čase váže část záměsové vody, naopak SCC s příměsí strusky je náchylnější ke krvácení [2] [19].

3.2.4.4 Rychlost roztečení

Rychlost toku je rozhodující při betonážích rozsáhlých a komplikovaných, protože do značné míry ovlivňuje časovou náročnost. Je důležitá pro prefabrikaci, kdy ovlivňuje produktivitu závodu [2].

3.2.4.5 Čerpatelnost

Prakticky každý čerstvý beton, klasifikovaný jako SCC je čerpatelný. Problémy může způsobovat vysoce viskózní beton s malou maximální velikostí kameniva a s extrémně vysokým obsahem jemných podílů nebo vláken [2].

3.2.4.6 Pohledovost povrchů

Pohledovost je určena konzistencí a odolností proti rozměšování čerstvého betonu. Odkazuje na schopnost vytvořit požadovanou finální úpravu povrchu. Nedá se nijak určit, snad jedině zhotovením konkrétního bednění, způsobu ukládání a klíčové charakteristiky dále zaznamenat pro následující aplikace [2].

3.2.4.7 Samonivelace

Tato schopnost je stěžejní pro výrobu betonových desek a podlah. Je nutné, aby čerstvý beton vykazoval dostatečnou odolnost proti rozměšování a nízké krvácení, tím se předejde vytvoření vrstvy, která je sice vyrovnaná, ale nevykazuje požadovanou kvalitu [2].

3.2.4.8 Odolnost proti rozplavování

Důležitá pro podvodní betonáž, kdy SCC musí vykazovat nadprůměrné požadavky na kohezi, která zajistí odolnost proti vymývání. Tyto betony obsahují stabilizátory zvyšující odolnost proti rozplavování, ale snižují schopnost vyplňování a rychlost toku. Musí se dbát na to, aby schopnost vyplňování neklesla pod hranici samozhutnotelnosti betonu [2].

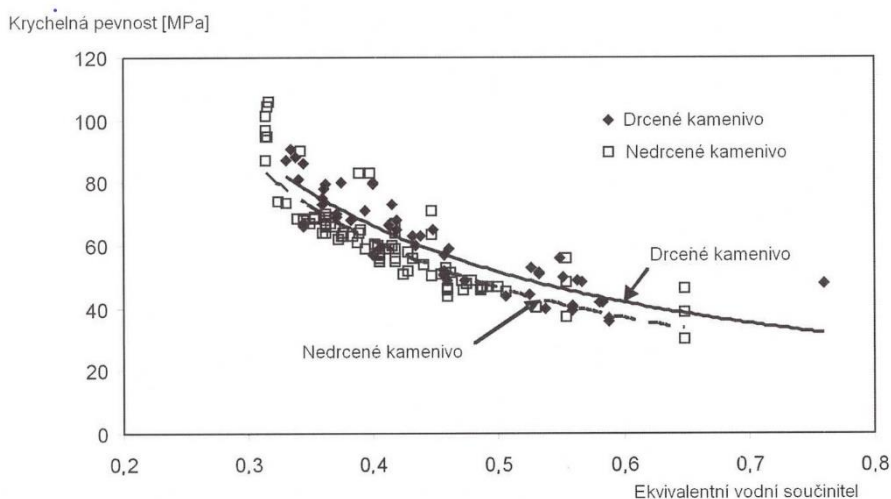
3.2.5 Mechanické vlastnosti SCC

Vlastnosti ztvrdlého SCC se od tradičního betonu nijak výrazně neliší, jsou ovlivňované tranzitní zónou mezi cementovou pastou a kamenivem. Snižováním vodního součinitele a přidáním pucolánových příměsí se modifikuje mikrostruktura pasty, a tak se optimalizuje tranzitní zóna, to má za následek snížení mezerovitosti a zjemnění kapilárních pórů v pastě. Rozdílem však mezi vlastnostmi

zatvrdlého SCC a tradičního betonu je lepší mikrostruktura a rovnoměrnost SCC. SCC má nižší vodní součinitel, a proto dosahuje vyšší pevnosti v tlaku. Další vlastností SCC je lepší schopnost odolávat mrazu a rozmrazovacím účinkům díky vyššímu podílu jemných částic, které zaručují hutnou strukturu a jsou tak i vodotěsné [2] [18].

3.2.5.1 Pevnost v tlaku

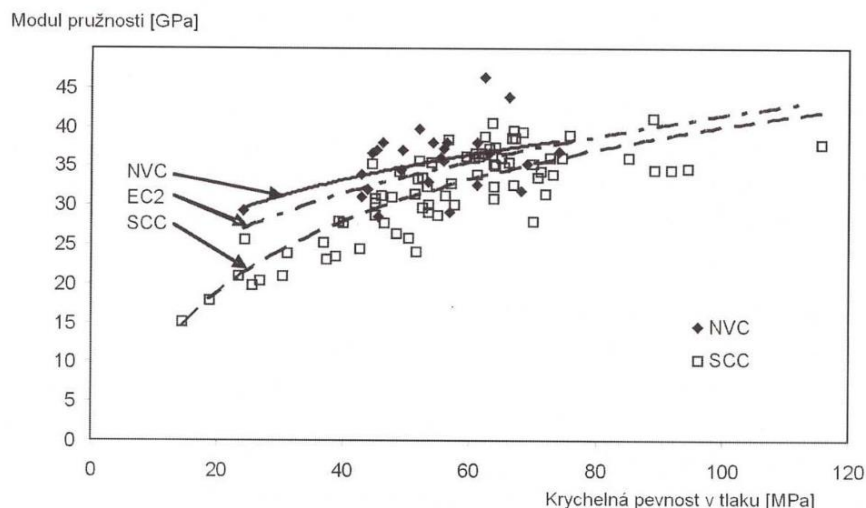
Pevnost SCC závisí na hodnotách vodního součinitele, který je ovlivněn přidáním superplastifikačních přísad, které vodní součinitel snižují, a tím zvyšují pevnost betonu. SCC lze vyrobit jakékoliv pevnosti v tlaku, a to od nízkých až po vysoké. Tyto betony obsahují vysoké množství jemných podílů příměsí, které při zatvrdnutí zhušťují mikrostrukturu. Zhuštěním příměsí dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku oproti tradičnímu vibrovanému betonu zhruba o 10 % po 28 dnech. Z důvodu přídavku příměsí je obtížné postavit recepturu pro beton s nízkou pevností (<25 MPa), než s vysokou pevností (> 70 MPa). Vysoký nárůst pevnosti v tlaku v prvních 28 dnech dokáže ovlivnit přidání mikromletého vápence. Na pevnost v tlaku nemá žádný vliv tvar kameniva, jestli je oblé nebo hrubé, tento vliv je vyobrazen v Obr. 4 [2] [18].



Obr. 4 Krychelná pevnost v tlaku ve srovnání s ekvivalentem vodního součinitele [2]

3.2.5.2 Statický modul pružnosti a houževnatost

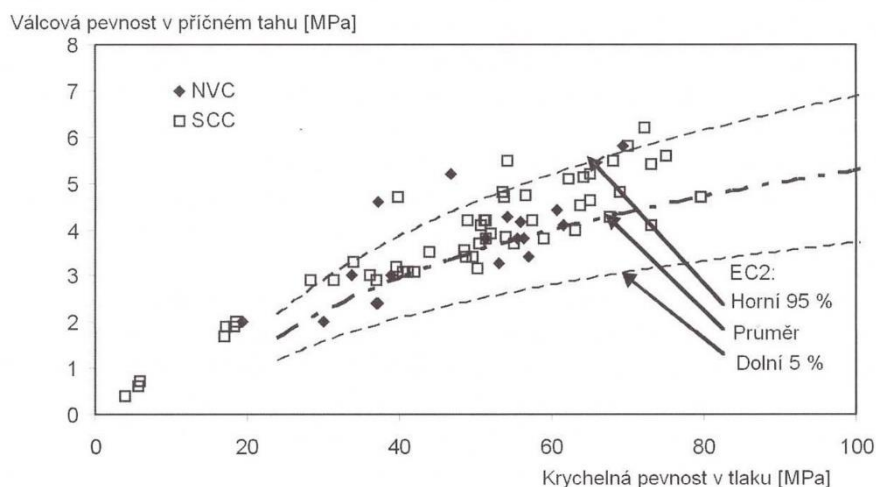
Modul pružnosti betonu ovlivňuje převážně hrubé kamenivo, kdy při nižším obsahu snižuje hodnotu modulu. Vyšší hodnoty modulu pružnosti dosahují betony s použitím těžného kameniva, které obsahuje menší množství jemných částic, toto zaručí ideální reologii betonu a výsledné hodnoty modulů jsou v porovnání s tradičními betony vyšší o 18–22 %. Tento fakt je v dnešní době často řešen, je zdokumentován v Obr. 5, kde jsou srovnány moduly pružnosti s danými pevnostmi v tlaku tradičních betonů a SCC [2] [18].



Obr. 5 Modul pružnosti ve srovnání s pevností v tlaku [2]

3.2.5.3 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu SCC je vyjádřena nepřímou pevností v tahu, která se obvykle stanovuje z výsledků zkoušek příčným tahem prováděné převážně na válcových vzorcích. Vztah mezi SCC a tradičním betonem v nepřímé pevnosti v tahu je vidět v Obr. 6, který ukazuje, že pevnost SCC je vyšší, anebo stejná jako u tradičního betonu, ale některé výsledky ukazují mnohonásobně vyšší pevnost SCC v tahu, a to až o 40 % [2] [18].



Obr. 6 Poměr nepřímé pevnosti v tahu k pevnosti v tlaku [2]

3.2.5.4 Dotvarování a smršťování

Betony SCC dosahují větších objemových změn, a to hlavně autogenního smrštění, smrštění od vysychání. Dotvarování SCC je srovnatelné s tradičními betony. Deformaci a smrštění ovlivňuje poměr hrubého kameniva s jemnými prachovými částicemi a obsah příměsí. Smrštění lze snížit použitím většího objemu kameniva, které způsobí vyšší modul pružnosti kameniva a ten způsobí nižší smrštění od vysychání. Dotvarování betonu lze ovlivnit druhem použitého cementu a jeho množstvím nebo množstvím vody v čerstvém betonu [2] [20].

3.3 Vláknobeton

Vláknobeton je beton s použitím různých typů rozptýlené výztuže tvaru vláken. Vlákná v betonu zachycují lokální tahové účinky, způsobené prostorovou napjatostí mezi zrny hrubého kameniva. Tato výztuž se nazývá tahová rozptýlená. Rozptýlená výztuž může mít taky charakter vláken, které budou mít za cíl snížit objemové změny v betonu, tím že zajistí polohu zrn kameniva. Tenhle typ výztuže nazýváme tlakovou rozptýlenou výztuží. Vláknobeton odolává vývoji mikrotrhlin a náhlým teplotním změnám [21]. Pro výrobu vláknobetonu se používají tři druhy materiálů, a to ocelová vlákna, skleněná vlákna a polymerní vlákna. Ocelová vlákna v poslední době zaznamenala vysoký vývoj v pevnosti v tahu, skoro na 1000 MPa, k dalšímu výraznému zlepšení vlastností došlo díky svému geometricky komplikovanému tvaru. Skleněná vlákna se používají z alkalivzdorného skla, které je oproti obyčejnému sklu chemicky stabilní v prostředí cementové pasty, a tak si ponechá velmi příznivé mechanické vlastnosti. Polymerní vlákna jsou postavena nejčastěji na bázi polypropylenu, a tyto vlákna v kombinaci se superplastifikátory a smršťení redukujícími přísadami dokáží přemostit a zastavit růst trhlin v betonu [20]. Nejčastěji použitým typem vláknobetonu je beton s přidáním vláken ocelového typu, tento beton se nazývá drátkobeton. I přes vysokou cenu drátkobetonu se zaznamenává stoupající nárůst jeho výroby, protože jeho přednosti převyšují jeho pořizovací náklady.

3.3.1 Složky drátkobetonu

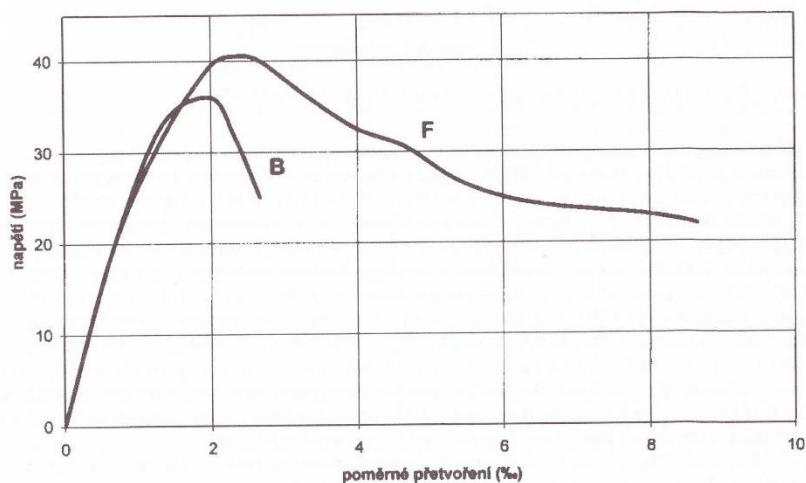
Základním požadavkem na drátky je vzájemná soudržnost s cementovým kamenem. Tuto soudržnost lze zajistit pomocí zakřivení drátků okolo zrn hrubšího kameniva, nebo také při výrobě drátků volit různé povrchové a koncové úpravy, jako např. vtisky a upravené konce. Důležitá je také délka, která musí být taková, aby vlákno přesahovalo za největší zrno kameniva, a to se tak mohlo o něj opřít. Drátky si dále musí při míchání, hutnění a ukládání zachovat svůj převážně přímkový tvar, který je zajištěn dostatečnou ohybovou tuhostí.

Při výběru kameniva se musí dbát na homogenitu frakcí. Velikost zrn hrubé frakce se musí přidávat v potřebném množství, aby nedošlo k vysokému nakypření betonu vlivem oddálení a zamezení skloubení zrn použitím drátků, které tento jev způsobují.

Do drátkobetonových konstrukcí se používá cement a přísady obdobně jako u tradičních betonů, ale důležitá je změna vodního součinitele, který se volí v rozmezí 0,4 – 0,5, což zajišťuje, že se drátky nebudou shlukovat ani oddělovat. Pro dobrou zpracovatelnost a bezchybné dopravení na stavbu je vhodné použít plastifikační nebo ztekucující přísady, které umožní pohyblivost čerstvého betonu a nedojde tak k znehodnocení při dopravě [21].

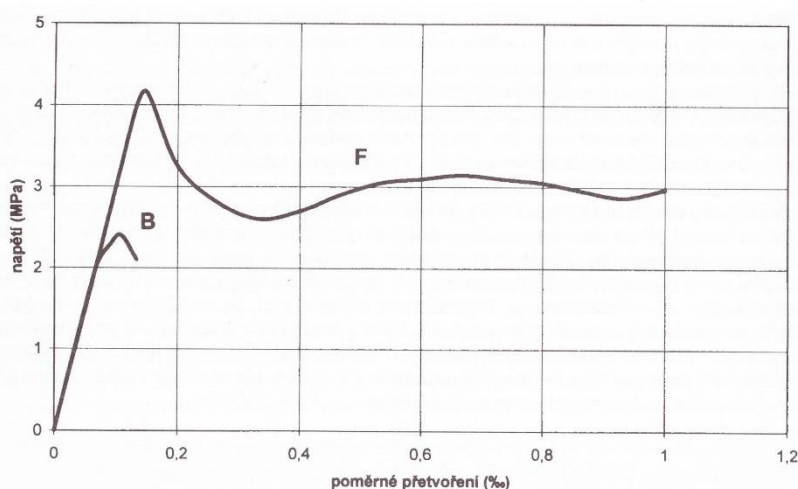
3.3.2 Vlastnosti drátkobetonu

Pevnost v tlaku drátkobetonu je rozdílná oproti tradičnímu betonu. U drátkobetonu dochází k plastickému přetváření po dosažení maximálního napětí. Při poklesu napětí na zhruba 50 % má pracovní diagram drátkobetonu téměř vodorovný směr a přetváření má charakter tečení. Touto vlastností dojde ke zpomalení procesu porušování, který je způsoben aktivací drátků po vzniku trhlin. U tradičního betonu dojde při maximálním napětí ke vzniku křehkých trhlin. Rozdíl mezi drátkobetonem F a tradičním betonem B je vidět v Obr. 7 [21].



Obr. 7 Deformační diagram v tlaku drátkobetonu F a tradičního betonu B [21]

Drátkobeton má oproti tradičnímu betonu vyšší pevnost v tahu. Tradiční beton, jak je všeobecně známo má velice nízkou pevnost v tahu, která se dá ovlivnit přidáním přiměřeného množství rozptýlených ocelových drátků, které oddalují rozvoje mikrotrhlin v jeho struktuře. Po vzniku trhlin se vlákna drátkobetonu aktivují a způsobí, že drátkobeton je schopný přenést reziduální tahová napětí. Velikost napětí je ovlivněna množstvím a tvarem drátků, přičemž mezní protažení je až desetinásobné oproti tradičnímu betonu, který je už při malém protažení porušen křehkým lomem. Tato vlastnost je znázorněna porovnáním pevnosti v tahu drátkobetonu F a tradičního betonu B v Obr. 8 [21].



Obr. 8 Deformační diagram v tahu drátkobetonu F a tradičního betonu B [21]

3.3.3 Použití drátkobetonu

Použití drátkobetonových konstrukcí se liší podle technologie výroby. Výroba se dělí na dva základní typy, kterými jsou klasická technologie uložení drátkobetonu do bednění a následným zpracováním, anebo technologie stříkaného betonu. Možnosti použití klasickou technologií jsou průmyslové podlahy, desky vozovek, letištní plochy, tenkostěnné konstrukce, trouby, skruže, panely, vazníky a technologii stříkaného betonu jsou ostění tunelů, stabilizace svahů, zajištění výrubů, zesilování nebo rekonstrukce stávajících konstrukcí [21].

3.4 Obecně o vybraných charakteristikách a jejich stanovení

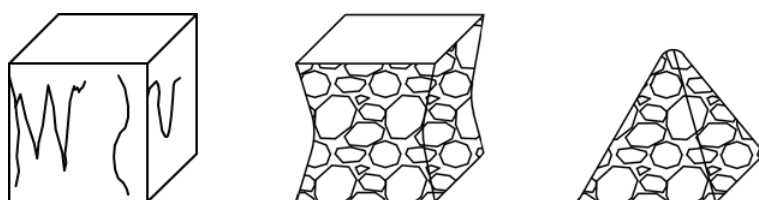
3.4.1 Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Tato kapitola se zabývá stanovením pevnosti betonu v tlaku podle normy ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [13]. Podstatou této zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa ve zkušebním lisu až do porušení. Po porušení tělesa se zaznamená síla, která těleso rozdrtila, a z té se následně vypočítá pevnost betonu v tlaku.

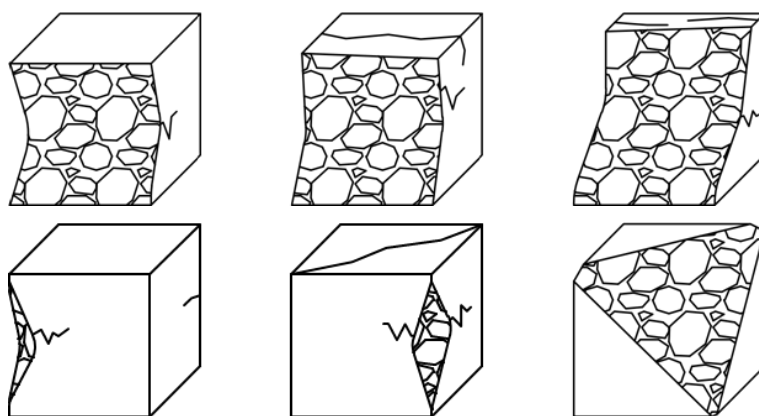
Zkušební tělesa se před vložením do lisu musí ošetřit odstraněním zbytků materiálu (např. zrna písku), otřít vodu na povrchu, které budou v kontaktu s tlačnými deskami. Tlačné desky lisu musí být také ošetřeny setřením dotykových ploch a dále je možné zkušební těleso do lisu vložit. Těleso se uloží na střed spodní tlačné desky s tolerancí 1 % určené velikosti zkušebního tělesa.

Zkouška začíná nastavením konstantní rychlosti zatěžování, a to v rozmezí $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($\text{N/mm}^2/\text{s}$). Po nastavení rychlosti zatěžování se plynule zvyšuje zatížení s přípustnou odchylkou ± 10 % až do porušení tělesa. Následně se zaznamená maximální dosažená síla v kN.

Těleso se dále vyhodnotí podle způsobu porušení, zdali je porušení vyhovující nebo ne. Příklady vyhovujících (Obr. 9) a nevyhovujících (Obr. 10) porušení udává norma ČSN EN 12390-3.



Obr. 9 Vhodné způsoby porušení zkušebních krychlí



Obr. 10 Nevhovující způsoby porušení zkušebních krychlí

Výsledná pevnost v tlaku je vyjádřena vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4)$$

Kde: f_c je pevnost v tlaku [MPa, N/mm^2]
 F maximální zatížení při porušení [N]
 A_c průřezová plocha zkušebního tělesa [mm^2]

Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa (N/mm^2).

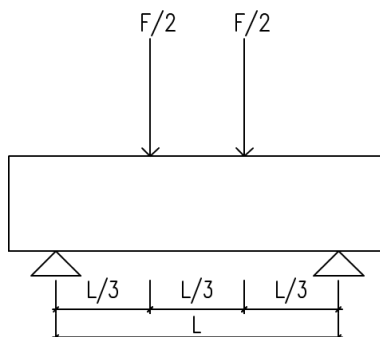
3.4.2 Stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem

Kapitola se bude zabývat stanovením pevnosti betonu v tahu ohybem podle normy ČSN EN 12390-5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles [14]. Zkouška je založena na zatížení zkušebních těles ohybovým momentem vyvozeným prostřednictvím horních zatěžovacích a dolních podpěrných válečků. Nejvyšší zatížení se zaznamená a následně z něj vypočítá pevnost v tahu ohybem.

Zkouška se provádí na kalibrovaném zkušebním lisu. Zařízení pro zatěžování se skládá ze dvou podpěrných válečků a dvou horních zatěžovacích válečků, které jsou kloubově připevněny k příčnému závěsu, který stejnoměrně rozděluje zatížení na oba válečky. Válečky jsou vyrobené z oceli s kruhovým průřezem o průměru 20–40 mm a musí být minimálně o 10 mm na každou stranu delší než zkušební těleso. Podpěrné válečky jsou od sebe vzdáleny na délku $3d$, kde d je šířka tělesa. Vzdálenost mezi zatěžovacími válečky musí být rovna d , a ty musí být umístěny uprostřed mezi podpěrnými válečky (Obr. 11). Válečky musí být osazeny v polohách s přesností $\pm 2,0$ mm.

Před začátkem zkoušky se musí zkušební tělesa ošetřit, a to tak, že se odstraní zrna písku nebo jiného uvolněného materiálu v místech styku s válečky. Očistit se musí také styčné plochy válečků. Z těles, která byla ošetřována ve vodě se musí otřít voda před vložením do lisu. Takto ošetřené těleso se vloží centricky do lisu, tak aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu zkušebního tělesa.

Zatěžovací zkouška se nesmí zahájit, dokud všechny plochy válečků nespočívají rovnoměrně na zkušebním tělese, jakmile jsou válečky rovnoměrně na zkušebním tělese, můžeme nastavit konstantní zatěžovací rychlost. Zatěžovací rychlost je v rozsahu 0,04 – 0,06 MPa/s ($\text{N/mm}^2\cdot\text{s}$). Těleso je plynule zatěžováno stanovenou konstantní rychlostí s odchylkou ± 1 % až do jeho porušení.



Obr. 11 Uspořádání zatěžování při čtyřbodovém ohybu

Výsledná pevnost v tahu ohybem je vyjádřena vztahem:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (5)$$

Kde: f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa, N/mm^2]

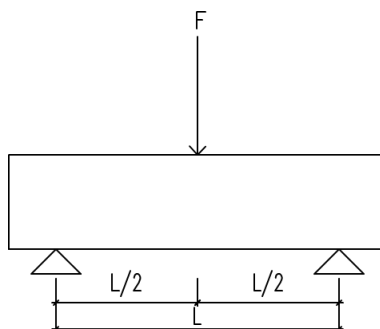
F maximální zatížení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 rozměry příčného řezu tělesa [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa (N/mm^2).

V případě zatížení jedním břemenem se použije pouze jeden zatěžovací váleček umístěný uprostřed rozpětí, jak je uvedeno na Obr. 12. Metoda udává zhruba o 13 % vyšší hodnotu pevnosti v tahu ohybem než zatěžování dvěma břemeny. Postup zkoušky se provede stejně jako u zatížení dvěma břemeny.



Obr. 12 Uspořádání zatížení při tříbodovém ohybu

Pevnost v tahu ohybem je pak dána vzorcem:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (6)$$

Kde: f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa, N/mm²]

F maximální zatížení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 rozměry příčného řezu tělesa [mm]

Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa (N/mm²).

3.4.3 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Stanovení této charakteristiky vychází z normy ČSN ISO 1920-10 Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku [15]. Podstatou této zkoušky je to, že zkušební těleso je vystaveno základnímu napětí 0,5 N/mm² (MPa), a poté se napětí plynule zvyšuje až na třetinu pevnosti betonu v tlaku válce o poměru délky k průměru 2:1. Modul pružnosti se dále vypočte z rozdílu horního a dolního napětí vyděleného poměrným přetvořením.

Zkušební lis má být v době zkoušky kalibrován a musí umožnit vyvození požadovaného zatížení se stanoveným časovým nárůstem napětí a jeho udržování na příslušné hodnotě. Zařízení měřící změny (např. odporový tenzometr) nesmí mít měřící základnu menší než dvě třetiny průměru zkušební tělesa, ale nesmí být větší než jeho průměr. Musí být umístěny tak, aby vzdálenost od obou konců tělesa byla přibližně stejná, avšak vzdáleny minimálně o jednu čtvrtinu délky tělesa. Přetvoření se měří minimálně na dvou protilehlých stranách tělesa. Přesnost přístroje musí být $\pm 5 \cdot 10^{-6}$.

Zkušební těleso musí být umístěno centricky mezi očištěné zatěžovací desky lisu. Po umístění tělesa do lisu se vyvodí základní napětí, které má hodnotu 0,5 N/mm², toto napětí se udržuje po dobu 60 sekund. Následně se v 30 sekundách zvyšuje napětí v konstantním rozmezí 0,2 - 0,6 N/mm², dokud se napětí nevyrovná třetinové pevnosti betonu v tlaku, toto napětí se udržuje po dobu 60 sekund. Po celou dobu tohoto cyklu měřící zařízení zaznamenává deformace potřebné k zjištění poměrného přetvoření. Tento cyklus opakujeme aspoň třikrát, kdy první dva cykly jsou předběžné a slouží k ověření centrace a do výpočtu vstupují hodnoty z posledního (třetího) cyklu.

Statický modul pružnosti je dán vztahem:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (7)$$

Kde:	σ_a	horní zatěžovací napětí [MPa, N/mm]
	σ_b	základní napětí [MPa, N/mm ²]
	ε_a	průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí
	ε_b	průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí

Výsledná hodnota statického modulu pružnosti se zaokrouhlí na 3 platná čísla v GPa.

3.4.4 Ultrazvuková impulzová metoda

Metoda vychází z normy ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu [16]. Podstatou zkoušení je stanovení šíření UZ vlnění v betonu. Z rychlosti šíření UZ vlnění lze určitě fyzikálně mechanické vlastnosti na základě odvozených vztahů mezi rychlostí šíření vlnění a sledovanými vlastnostmi betonu. Z měření UZ lze stanovit:

- Rychlost šíření UZ vlnění
- Dynamický modul pružnosti betonu
- Pevnost betonu
- Degradaci betonu (průběžným měřením stejného prvku v delším časovém horizontu)
- Objemovou hmotnost, rovnoměrnost betonu

Zařízení a přístroje pro stanovení doby průchodu UZ vlnění v betonu jsou dvojího typu, a to s obrazovkou nebo s automatickým měřením času. Součástí každého zařízení je kalibrační prvek (např. etalon), který slouží k ověření přesnosti měření doby průchodu UZ vlnění. Přístroj se skládá ze dvou sond, a to budiče, který vyvodí impuls, druhá sonda přijímá ultrazvukové vlnění a měří ho na jeho elektrický obraz, ta se nazývá snímač. Kmitočet budiče se dá volit podle nejmenšího bočního rozměru tělesa a pevnosti betonu, avšak tento kmitočet bývá ve stavebnictví v rozsahu 20–500 kHz. Vzdálenost sond ovlivňuje čas šíření impulsů UZ vln a rozlišuje se na:

- Přímé – budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách proti sobě
- Polopřímé – budič i snímač jsou umístěny na protilehlých stranách ne přímo proti sobě, ale na sousedních stranách
- Nepřímé – obě sondy jsou umístěny na stejné straně a měří se povrchové vlny

Pro přímé a polopřímé prozvučování se rychlost šíření impulsu vypočítá ze vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (8)$$

Kde:	v_L	rychlost impulsu [km/s]
	L	délka měřicí základny [mm]
	T	čas včetně t_{kor} , který uplyne při impulsu měřicí základnou, tj. $T = T_L \pm t_{kor}$
	t_{kor}	korekce, která se skládá z mrtvého času přístroje a rozdílu času šíření UZ vln

Rychlost impulsu se vyjádří na nejbližší 0,01 km/s nebo na 3 významná čísla.

Dynamický modul pružnosti v tlaku a v tahu se vypočítá podle vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (9)$$

Kde: ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]
 v_L impulzová rychlost podélného UZ vlnění [km/s]
 k součinitel rozměrnosti prostředí

Hodnoty součinitele k_2 pro dvojrozměrné a k_3 pro trojrozměrné prostředí se určí ze vztahů:

$$k_2 = \sqrt{\frac{1}{1 - v_{cu}^2}}$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{1 - v_{cu}}{(1 + v_{cu})(1 - 2 v_{cu})}}$$

Pro jednorozměrné prostředí je součinitel $k_1 = 1$.

Pevnost betonu v tlaku se stanoví pomocí kalibračního vztahu vytvořeného pro zkoušený beton, pro určení pevnosti betonu s nezaručenou přesností postačí směrný kalibrační vztah:

$$f_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8 \quad (10)$$

Kde: v_{L3} impulzová rychlost UZ podélných vln v trojrozměrném prostředí [km/s]
 f_{be} pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností [MPa]

Směrný kalibrační vztah neplatí pro betony s jinými než běžnými vlastnostmi cementu a kameniva, pro mezerovité a málo hutněné betony.

3.4.5 Rezonanční metoda zkoušení betonu [17]

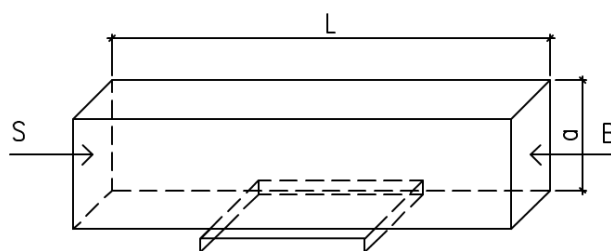
Podstatou zkoušky je stanovení vlastní frekvence kmitání zkušební tělesa, která se používá spolu s jinými veličinami k určení fyzikálně mechanických vlastností betonu a jejich změn. Pomocí zjištěných vlastních frekvencí kmitání zkušebních těles je možné stanovit:

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu
- Dynamický modul pružnosti betonu ve smyku
- Dynamický Poissonův koeficient betonu
- Jiné vlastnosti, např. degradace betonu v čase

Zařízení a přístroje sloužící ke zkoušení betonu rezonanční metodou obsahují dva prvky, kterými jsou budič a snímač ve formě sondy. Zařízení musí být pravidelně kontrolováno. Zkušební tělesa bývají tvaru hranolu, válce a krychle. Těleso bývá uloženo na upraveném podkladu, který neomezuje pohyb vzorku při kmitání a jeho vlastní kmitočet byl mimo rozsah vlastních kmitočtů zkušební tělesa, zpravidla tyto podklady bývají z gumy nebo u malých těles z pórovité podložky. Podle umístění sondy

snímače a polohy budiče rozlišujeme kmitání na podélné (anglicky longitudinal), příčné (anglicky flexural) a kroutivé (anglicky torsional). Lze rozlišit dva způsoby určení rezonančních frekvencí. První způsob je kontinuální, kdy je zkušební těleso rozkmitáno plynulou změnou frekvence budícího zařízení a jeho kmitání se snímá snímacím zařízením, které zaznamenává indikačním členem přístroje velikost amplitudy – sleduje se maximální amplituda vlastního kmitočtu kmitajícího tělesa. Druhou metodou měření je impulzní, kdy impulzem je mechanický úder a snímá se celé spektrum frekvencí pomocí snímače akustické emise. Software pracující na základě rychlé Fourierovy transformace určí vlastní frekvenci přiřazením nejvyšší amplitudy – graficky je vidět jako tzv. peak.

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu z vlastního kmitočtu podélného kmitání – těleso je umístěné na podložce v polovině své délky, poloha budiče B a snímače S je znázorněna podle Obr. 13.



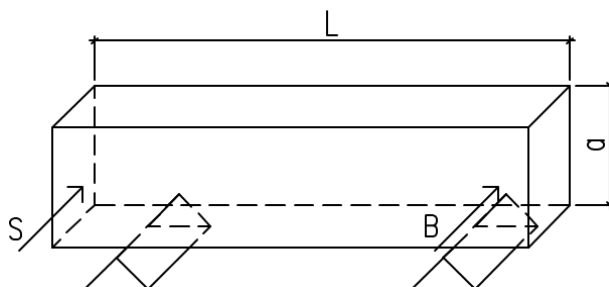
Obr. 13 Poloha sond při podélném kmitání

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu z vlastního kmitočtu podélného kmitání se určí ze vztahu:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (11)$$

Kde: L délka zkoušeného tělesa [m]
 f_L první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa
 ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu z vlastního kmitočtu příčného kmitání – těleso je umístěné na dvou podložkách vzdálených od sebe 0,224 L, poloha budiče B a snímače S je znázorněna podle Obr. 14.



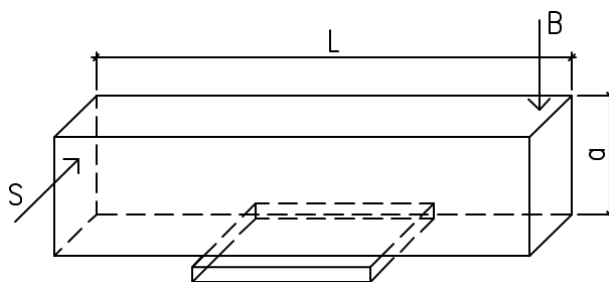
Obr. 14 Uspořádání sond při příčném kmitání

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu z vlastního kmitočtu příčného kmitání se určí ze vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2} \quad (12)$$

Kde: c_1 je korekční součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů
 L délka zkušební tělesa [m]
 f_f první vlastní kmitočet příčného kmitání zkušební tělesa [kHz]
 ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]
 i poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušební tělesa [m]

Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku z vlastního kmitočtu kroutivého kmitání – těleso je umístěné na podložce v polovině své délky, poloha budíče B a snímače S je znázorněna podle Obr. 15.



Obr. 15 Uspořádání sond při kroutivém kmitání

Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku z vlastního kmitočtu kroutivého kmitání se určí ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (13)$$

Kde: L délka zkušební tělesa [m]
 f_t první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušební tělesa [kHz]
 ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]
 k součinitel charakterizující tvar příčného řezu tělesa, a vyjadřující poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení

Součinitel k se dosadí do vztahu v hodnotách roven 1 pro válce, 1,183 pro krychle a pro hranoly s obdélníkovým průřezem součinitel k stanovíme pomocí vztahu:

$$k = - \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - 2,52 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21 \cdot \left(\frac{b}{h}\right)^6}$$

Kde: b vyjadřuje délku kratší strany průřezu hranolu
 h vyjadřuje délku delší strany průřezu hranolu

Dynamický Poissonův koeficient se stanoví pomocí vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{cr}}{G_{cr}} - 2 \right) \quad (14)$$

nebo přímo z hodnot vlastních kmitočtů podle vztahu:

$$\nu_{cr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_L^2}{f_t^2} - 2 \right) \quad (15)$$

Kde: E_{cr} a G_{cr} jsou dynamické moduly pružnosti betonu, zjištěné z hodnot vlastních kmitočtů podélného a kroutivého kmitání zkušebního tělesa

k koeficient závislý na tvaru průřezu, vyjádřený jako poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení

f_L, f_t hodnoty prvních vlastních kmitočtů podélného a kroutivého kmitání zkušebního tělesa

4 Praktická část

Praktická část práce bude věnována zkoušení různými typy destruktivních i nedestruktivních zkoušek na vyrobených tělesech. Zkoušky se budou provádět na tělesech ze dvou druhů betonu, kterými jsou prostý samozhutnitelný a samozhutnitelný beton s přidáním ocelových vláken. Závěr této kapitoly se zabývá vyhodnocením provedených zkoušek a stanovením příslušných pevnostních, pružných a přetvárných charakteristik betonu.

4.1 Výroba a ošetření zkušebních těles

Výroba zkušebních těles byla vždy prováděna ve dvou etapách. První etapou byla samotná výroba betonu a jeho ukládání do forem, které byly ošetřeny odbedňovacím přípravkem. Druhou etapou bylo po 24 hodinách odbednění forem a uložení těles do připravené nádrže naplněné vodou, kde byla tělesa po dobu určenou požadovaným stářím betonu k provedení zkoušek.

4.1.1 Vstupní suroviny pro výrobu

V následující kapitole budou uvedeny jednotlivé složky pro výrobu prostého SCC, tak i SCC vyztuženého vlákny. Výroba prostého samozhutnitelného betonu se skládala z cementu (Obr. 16-B), mikromletého vápence (Obr. 16-C), superplastifikační přísady (Obr. 16-E), záměsové vody a kameniva dvou frakcí, a to 0-4 mm (Obr. 16-A) a 4-8 mm (Obr. 16-D). Pro výrobu SCC vyztuženého vlákny se použily stejné složky jako pro výrobu prostého, a navíc se přidala ocelová vlákna (Obr. 16-E) o délce 38 mm. Všechny použité suroviny byly českého původu.



Obr. 16 Použité složky při výrobě betonů

4.1.2 Výroba betonů

Následující řádky budou věnovány postupu výroby obou betonů, které byly vyráběny v areálu firmy Svoboda a syn, s.r.o. pod dohledem technologa.

Výroba čerstvého prostého SCC ze složek uvedených v předešlé kapitole probíhala v několika fázích. První fází bylo dávkování jednotlivých složek, které bylo prováděno hmotnostně, pouze dávkování superplastifikační přísady bylo prováděno objemově. V případě kameniva byl brán ohled na jeho vlhkost, která mohla být povrchová, tak nasáklá. Po pečlivém navážení složek k výrobě čerstvého betonu nastávala druhá fáze, a to míchání. Postup míchání probíhal nejprve smícháním suchých složek, kdy se prvně smíchaly frakce kameniva a následně došlo k přidání pojivých složek, tj. cementu a mikromletého vápence. Po smíchání suchých složek došlo k přidávání záměsové vody, která se přidávala s ohledem na doporučené dávkování chemických přísad ve dvou dávkách, kdy se první dvě třetiny vody postupně přidávaly do suché směsi. Zbýlá třetina vody se nejprve smíchala se superplastifikační přísadou, která má vyšší hustotu, a tak dojde k její aktivaci a dispergaci, následně je voda smíchaná s přísadou postupně přidávána do čerstvého betonu, dokud se nedosáhne požadované zpracovatelnosti betonu.

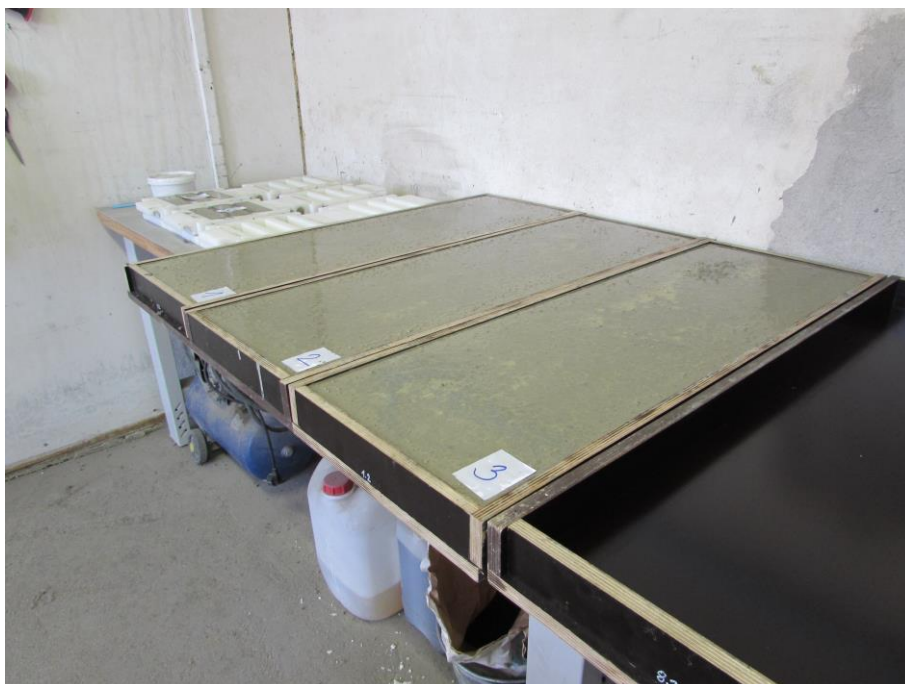
SCC s přidáním ocelových vláken (později drátkobeton) byl vyráběn obdobným způsobem, jako prostý SCC, ale došlo i k určité změně při míchání. Po smíchání suchých složek a záměsové vody s přidáním superplastifikační přísady došlo k postupnému dávkování ocelových vláken, a to z důvodu rovnoměrného rozmístění v čerstvém betonu a nedošlo tak ke shluknutí vláken.

4.1.3 Zkušební tělesa

Pro stanovení vybraných charakteristik betonu bylo důležité vyrobit dva typy zkušebních těles, kterými byly trámce o rozměrech 40 x 40 x 160 mm a desky 300 x 50 x 900 mm (Obr. 17). Celkem bylo vyrobeno 18 kusů trámců z prostého SCC, 9 kusů desek z prostého SCC i drátkobetonu. Tělesa byla vyrobena v souladu s normou ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy [22]. Tvar, rozměry a nepravidelnost těles může mít za následek nemožnost stanovení určitých zkoušek, jako např. stanovování statického modulu pružnosti v tlaku z důvodu nemožnosti uchycení měřících zařízení, anebo nedostatečné dosednutí desek lisu při zkoušce pevnosti v tlaku.

Po vyrobení čerstvého betonu podle postupů uvedených v předešlé podkapitole následovalo vylití betonu z míchačky do přepravní nádoby (stavební kolečko) a ukládání betonu do příslušných forem. Kapacita míchačky umožňovala pouze naplnění třech forem na desky a dvě formy po třech trámcích, tedy tento postup se u obou betonů opakoval třikrát (pouze u drátkobetonu nebylo třeba vyrábět trámce). SCC má schopnost samozhutnitelnosti, a tak není potřeba jej dále hutnit, tedy formu

samovolně vyplní a poté stačí jeho povrch pomocí hladítka urovnat. Po zavadnutí povrchu betonu, což je asi hodina, byla zkušební tělesa přikryta PE fólií.



Obr. 17 Formy pro výrobu těles: vlevo nahoře pro trámce a uprostřed pro výrobu desek

4.1.4 Odbednění a ošetření těles

Po 24 hodinách došlo k přepravě z areálu firmy Svoboda a Syn do laboratoře ústavu stavebního zkušebnictví. V laboratoři se tělesa odformovala a uložila do připravené nádrže s vodou (Obr. 18), kde byla tělesa ošetřována podle normy při teplotě vody $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, po dobu potřebnou pro stanovení vybraných charakteristik.



Obr. 18 Ukázka odformování A a uložení těles v ošetřovací nádobě B

4.2 Stanovení vybraných charakteristik trámců

Pro stanovení vybraných charakteristik bylo použito celkem 12 kusů trámců, které byly zkoušeny po 7 dnech a po 28 dnech. Vždy před započítáním zkušebních metod byla tělesa vyjmuta z nádoby naplněné vodou, ve které byla ošetřována. Po vyjmutí z nádoby byla tělesa otřena hadříkem, a tak zbavena povrchové vody, následně se tělesa zvážila a změřily se jejich rozměry minimálně ve třech místech. Z naměřených hodnot se vždy stanovil průměr šířky, výšky a délky, a z těchto hodnot se stanovila objemová hmotnost těles. Následně mohlo začít samotné zkoušení těles nejdříve nedestruktivně (ultrazvukovou impulzovou metodou a rezonanční metodou), a poté destruktivně - zkoušky pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a stanovení statického modulu pružnosti v tlaku.

4.2.1 Stanovení pružných a přetvárných charakteristik trámců

Na vyrobených trámcích se nejprve určovaly pružné a přetvárné parametry materiálů, mezi které patří:

- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cu}
- Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu E_{cr}
- Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr}
- Dynamický Poissonův koeficient ν_{cr}
- Statický modul pružnosti v tlaku E_c

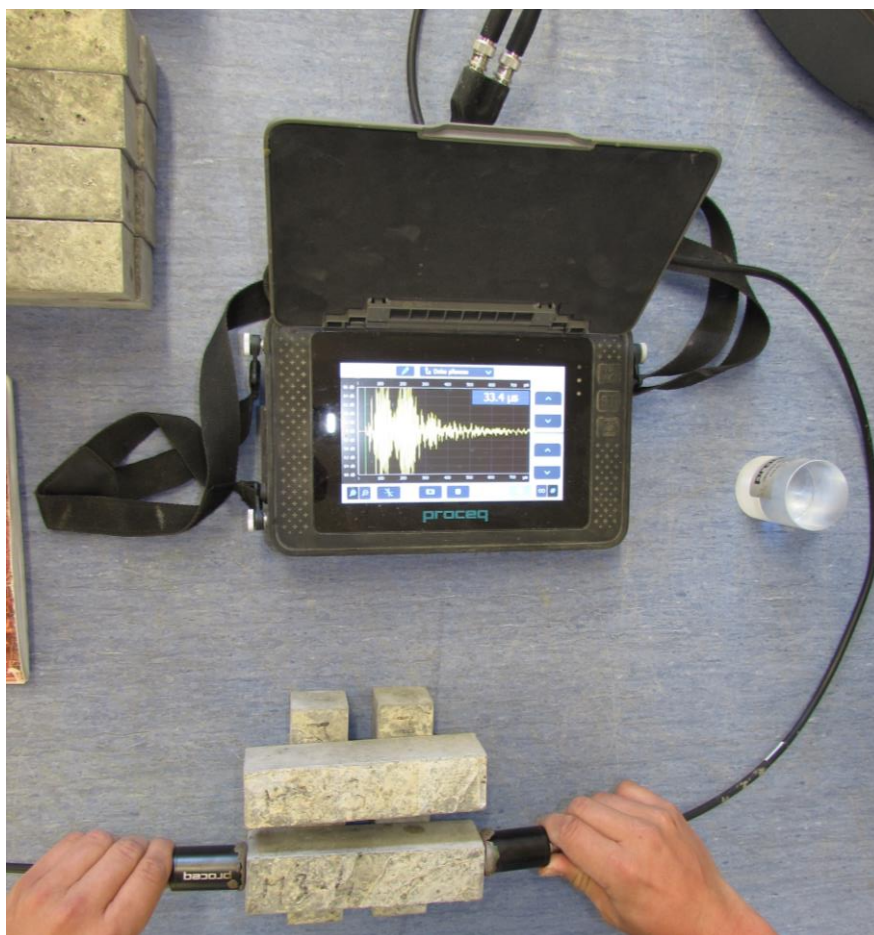
Charakteristiky se určovaly pomocí zkušebních metod:

- Ultrazvuková impulzová metoda
- Resonanční metoda
- Cyklickým zatěžováním a odtěžováním zkušebního tělesa v tlaku při postupném zvyšování zatížení

Postup provádění uvedených metod byl podrobně probrán v teoretické části v podkapitolách 3.4.3, 3.4.4 a 3.4.5.

4.2.1.1 Ultrazvuková impulzová metoda

Měření UZ impulzovou metodou bylo prováděno přístrojem Pundit PL-200 (Obr. 19) od společnosti Proceq. Přístroj se musel před započítáním měření kalibrovat. Kalibrace byla provedena etalonem s dobou průchodu impulzu $25,4 \mu s$. Po kalibraci následovalo samotné měření zkušebních těles, kdy se každé těleso třikrát prozvučovalo přímým způsobem a zaznamenaly se hodnoty průchodu ultrazvukových vln. Hodnoty získané touto metodou budou uvedeny v příloze bakalářské práce v Tab. N.H.1. Z naměřených hodnot doby průchodu se stanovila rychlost šíření impulzu v_L [km/s]. Stanovená rychlost šíření impulzu slouží ke stanovení dynamického modulu pružnosti v tlaku i tahu E_{cu} [GPa] podle vzorce (9) v podkapitole 3.4.4. Hodnoty vypočítané podle tohoto vzorce jsou uvedeny v Tab. 1 a 2.



Obr. 19 Ultrazvukový přístroj Pundit PL-200 od společnosti Proceq

4.2.1.2 Rezonanční metoda

Pro správné měření rezonanční metodou je důležité nejprve stanovit očekávané první frekvence pro kmitání, které se stanoví z rychlosti šíření ultrazvukového impulzu. Po stanovení první frekvence pro podélné, příčné a kroutivé kmitání se zkušební těleso položí na podložku z pěnového polyuretanu, tedy molitanu, a následuje samotné měření rezonančních frekvencí (Obr. 20). Každé těleso je měřeno třemi způsoby, které se liší polohu budiče a snímače. Všechny tři způsoby jsou uvedeny v teoretické části na Obr. 13, 14 a 15. Skutečné hodnoty frekvencí se hledají v oblasti stanovených prvních frekvencí kmitání (uvedené v Tab. N.H.2), a z těchto hodnot je dále možné stanovit dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu z podélného E_{crl} podle vzorce (11) nebo příčného kmitání E_{crf} podle vzorce (12), dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} podle vzorce (13) a dynamický Poissonův koeficient ν_{cr} podle vzorců (14) a (15). Výsledky podle vzorců uvedených v kapitole 3.4.5 teoretické části budou uvedeny v Tab. 1 a 2.



Obr. 20 Měření rezonanční metodou

4.2.1.3 Měření pomocí cycklického zatěžování a odtěžování

Zatěžovací zkouška probíhala na lisu DELTA 6-300 od firmy FORM+TEST, a dále se používaly elektronicko-odporové tenzometry, viz [23], které jsou součástí zkušebního lisu, pro měření podélných deformací tělesa (Obr. 21). Zkouška probíhala podle postupu uvedeného v kapitole 3.4.3 teoretické části. Horní zatěžovací mez byla stanovena na základě pevnosti v tlaku zlomků po zkoušce ohybem, o těchto pevnostních zkouškách bude pojednáno dále. Po dokončení třech cyklů zatěžování a odtěžování se ze zkušebního tělesa odejmou elektronicko-odporové tenzometry a pokračuje se zatěžováním až do porušení tlakovou silou (Obr. 22). Z naměřených hodnot deformací posledního cyklu zatěžování se vypočítá průměrná hodnota deformace při horním zatížení 33 kN, i základním napětí vyvozeném silou 1 kN. Od deformace při horním napětí se odečte deformace základního napětí, a z této hodnoty se vyčítá poměrné přetvoření, které společně s hodnotami horního zatěžovacího napětí a základního napětí vstupují do výpočtu statického modulu pružnosti v tlaku vzorcem (7). Výsledné hodnoty statických modulů pružnosti v tlaku jsou uvedeny v Tab. 1 a 2.



Obr. 21 Zatěžovací lis DELTA 6-300 od firmy FORM+TEST



Obr. 22 Zkušební těleso porušené tlakovou silou

4.2.1.4 Diskuze pružných a přetvárných charakteristik

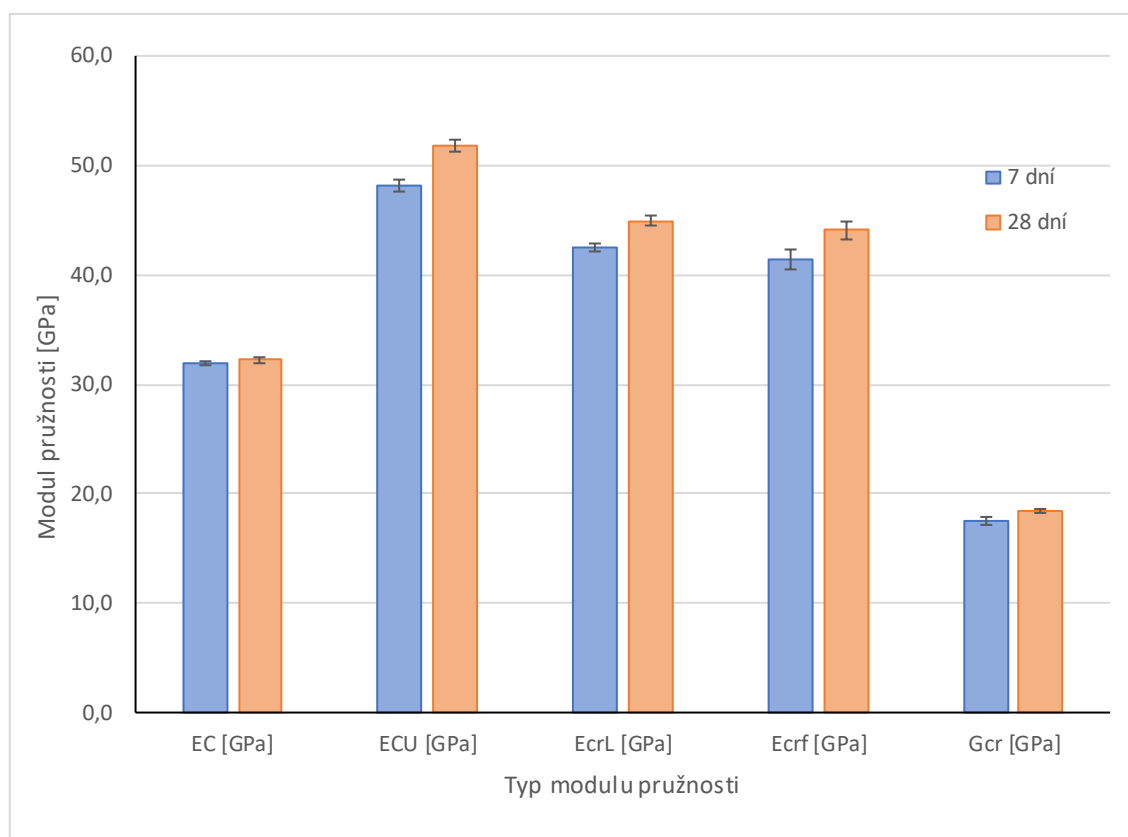
Z vypočítaných hodnot uvedených v Tab. 1 a Tab. 2 je patrné, že statický modul pružnosti v tlaku vypočítaný z cyklického zatěžování a odtěžování nabývá nižších hodnot než moduly dynamické, a to poměrně výrazně (zmenšovací součinitel $\kappa_r = 0,75$ a $\kappa_u = 0,66$ ve stáří 7 dní a $\kappa_r = 0,72$ a $\kappa_u = 0,62$ ve stáří 28 dní). Nižší hodnoty statického modulu pružnosti v tlaku jsou způsobeny použitým druhem kameniva, kterým byl kačírek o $D_{max} = 8$ mm. Malé průměry zrn kameniva zaručily nižší hodnoty statického modulu, protože ho přímo ovlivňuje. Porovnání jednotlivých modulů je uvedeno v Grafu 1. Konkrétní porovnání jednotlivých modulů pružnosti po 7 a 28 dnech je uvedeno v přílohách: Graf P.1, Graf P.2, Graf P.3 a Graf P.4.

Tab. 1 Vypočítané pružné a přetvárné charakteristiky po 28 dnech

Těleso	Ultrazvuková metoda	Rezonanční metoda				Statický modul
	E_{cu} [Gpa]	E_{crL} [Gpa]	E_{crf} [Gpa]	G_{cr} [Gpa]	ν_{cr} [-]	E_c [Gpa]
M1-3	52,0	44,8	44,1	18,4	0,22	
M1-4	52,4	44,8	44,8	18,3	0,22	32,1
M1-5	52,4	45,2	44,5	18,6	0,22	
M1-6	52,2	45,3	43,5	18,6	0,22	
M2-3	51,9	45,3	44,8	18,7	0,21	
M2-4	52,0	45,7	42,9	18,7	0,22	32,0
M2-5	52,1	45,0	44,5	18,7	0,20	
M2-6	51,1	44,3	43,1	18,4	0,20	
M3-3	51,7	44,9	42,5	18,5	0,21	
M3-4	52,1	45,4	44,7	18,5	0,22	32,6
M3-5	51,1	44,6	44,9	18,1	0,23	
M3-6	51,0	44,4	44,5	18,3	0,21	

Tab. 2 Vypočítané pružné a přetvárné charakteristiky po 7 dnech

Těleso	Ultrazvuková metoda	Rezonanční metoda				Statický modul
	E_{cu} [GPa]	E_{crL} [GPa]	E_{crf} [GPa]	G_{cr} [GPa]	ν_{cr} [-]	E_c [GPa]
M1-1	49,2	42,4	40,8	17,2	0,23	
M1-2	48,4	41,9	42,5	17,0	0,23	32,1
M1-3	49,0	42,5	41,6	17,5	0,22	
M1-4	47,9	42,2	40,5	17,5	0,21	
M1-5	48,3	42,4	42,0	17,6	0,21	
M1-6	48,3	42,6	40,6	17,4	0,22	
M2-1	48,4	43,0	42,2	17,9	0,20	
M2-2	48,8	43,2	41,5	17,7	0,22	31,8
M2-3	48,3	42,8	41,5	17,6	0,22	
M2-4	48,2	42,7	39,8	17,7	0,20	
M2-5	48,4	42,8	41,9	17,8	0,20	
M2-6	46,8	42,2	41,2	16,5	0,28	
M3-1	48,1	42,7	42,4	17,4	0,23	
M3-2	47,9	42,1	40,7	17,3	0,22	32,1
M3-3	48,2	42,4	39,7	17,8	0,19	
M3-4	48,4	42,7	41,9	17,5	0,22	
M3-5	47,5	41,9	42,4	17,0	0,23	
M3-6	47,6	41,8	42,0	17,4	0,20	



Graf 1 Porovnání modulů pružnosti

4.2.2 Stanovení vybraných pevnostních charakteristik betonu

Pevnostní zkoušky trámců probíhali podle normy ČSN EN 196-1 [24]. Jedná se sice o beton, ale protože $D_{\max} = 8 \text{ mm}$, byla vyrobena malá zkušební tělesa $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, tedy tzv. „cementářské“ trámečky. Samotné zkoušení pevnostních vlastností proto probíhalo podle výše uvedené „cementářské“ normy.

4.2.2.1 Pevnost betonu v tahu ohybem

Zkouška pevnosti betonu v tahu ohybem se prováděla na přístroji LabTest 6.30 od firmy LaborTech (Obr. 23) za pomoci softwaru TEST&MOTION, který přístroj řídí a zaznamenává průběh zkoušky. Zatěžovací zkouška probíhala podle postupu uvedeného v teoretické části v podkapitole 3.4.2. Pro tuto zkoušku se použilo šest trámců. Zkoušely se tři trámce po 7 dnech a tři trámce po 28 dnech. Těleso bylo zatěžováno konstantní zatěžovací rychlostí tříbodovým ohybem až do porušení ohybovou trhlinou (Obr. 24). Při porušení tělesa ohybovou trhlinou se zaznamenala nejvyšší naměřená síla, která vstupuje do vzorce (6) pro tříbodovou ohybovou zkoušku. Vypočítaná pevnost betonu v tahu ohybem je uvedena v Tab. 3 a hodnoty vstupujících do výpočtu jsou uvedeny v příloze Tab. N.H.3.



Obr. 23 Přístroj LabTest 6.30 od firmy LaborTech



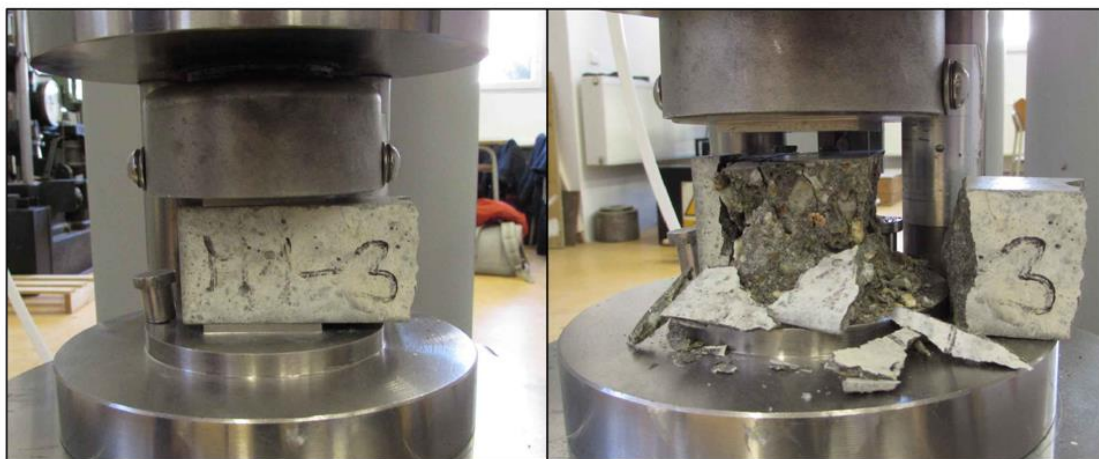
Obr. 24 Porušení tělesa ohybovou trhlinou

Tab. 3 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem po 7 a 28 dnech

Pevnost v tahu ohybem			
Těleso	f_{ct} [MPa] po 7 dnech	Těleso	f_{ct} [MPa] po 28 dnech
M1-1	7,8	M1-3	7,7
M2-1	8,0	M2-3	9,0
M3-1	8,2	M3-3	7,4
Průměr	8,0	Průměr	8,0
Výb. směr. odchylka	0,16	Výb. směr. odchylka	0,85

4.2.2.2 Pevnosti betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku se zkoušela pomocí přístroje DELTA 6-300 od firmy FORM+TEST (Obr. 21). Jako zkušební těleso (krychle) sloužil zlomek trámce ze zkoušky tahu ohybem (Obr. 24). Průřezová plocha krychle zatěžovaná deskou lisu byla dána rozměry 40 x 40 mm. Zkouška probíhala podle postupu uvedeného v teoretické části 3.4.1. Krychle byla namáhána konstantní zatěžovací rychlostí až do porušení (Obr. 25) a z maximální naměřené síly se pomocí vzorce (4) vypočítala pevnost v tlaku. Vypočítané pevnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v Tab. 4. Maximální naměřené síly jsou uvedeny v příloze Tab. N.H.3 spolu se silami ze zkoušky pevnosti betonu v tahu ohybem.



Obr. 25 Těleso porušené tlakovou silou

Tab. 4 Vypočítané pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech

Pevnost v tlaku					
Těleso	f_c [MPa] po 7 dnech		Těleso	f_c [MPa] po 28 dnech	
M1-1	69,6	64,1	M1-3	83,9	81,8
M2-1	71,5	71,8	M2-3	78,3	79,4
M3-1	69,9	70,0	M3-3	80,3	73,7
Průměr	70,3	68,6	Průměr	80,8	78,3
Výb. směr. odchylka	0,98	4,01	Výb. směr. odchylka	2,83	4,14

4.2.2.3 Diskuze pevnostních zkoušek

Vyhodnocení zkoušek pevnosti v tahu ohybem po 7 dnech a 28 dnech ukazovalo, že průměrná pevnost v tahu ohybem se neliší a v obou případech vykazovala pevnost 8,0 MPa, ve stáří 28 dní pouze s vyšší variabilitou. Jinak tomu bylo v případě zkoušky pevnosti v tlaku, kdy se průměrná pevnost v tlaku po 7 dnech stanovila na 69,5 MPa a pevnost v tlaku po 28 dnech vyšla 79,6 MPa. Je nutno zdůraznit, že pevnosti zkušebních těles podle jednotlivých míchaček se téměř nelišily a nevykazovaly nijak zásadní odchylky. V tomto případě se jednalo o poměrně nízkou variabilitu výsledků, ale lze říci, že pevnosti betonu jednotlivých míchaček se zásadně neliší.

4.3 Stanovení vybrané charakteristiky desek

Hlavní náplní práce bylo porovnání chování desek z prostého SCC a SCC vyztuženého vláky (vláknobeton, v našem případě drátkobeton) při zatížení v tahu ohybem. Toto měření se provádí z důvodu ověření možnosti použití zkoušeného betonu pro výrobu zahradního nábytku, parkových laviček apod. – jedná se však pouze o prvotní studii. Desky z prostého SCC jsou označeny C1–C9 a vláknobeton SRFC1-SRFC9. Touto zkouškou a vyhodnocením se bude zabývat následující kapitola. Na betonových deskách se zkoušely tři typy zatížení, kterými bylo zatížení bodem na střed desky, linií ve středu rozpětí a zatížení kruhovou deskou o průměru 200 mm na střed desky. Ošetřené, otřené a změřené desky byly uloženy do lisu s osovou vzdáleností podpor 840 mm tak, že hladký povrch (dno formy při výrobě) byl nahoře. Protože při výrobě hlazený (ale ne zcela rovný) povrch desek byl při zkoušce dole, byly desky mezi podpory a desku umístěny pružné podložky. Desky byly vystrojeny dvěma indukčnostními snímači dráhy 20 mm [25] uprostřed a dále vždy jedním snímačem nad každou z podpor. Desky se zkoušely zatěžovacím lisem LabTest 6.250 (Obr. 26) od firmy LaborTech za pomoci softwaru TEST&MOTION, který řídí plynulý posun příčnicku o rychlosti 0,15 mm/minutu. Deformace desek v průběhu zkoušky zaznamenávala ústředna Quantum X (Obr. 27) a software Catman Easy od firmy HBM.



Obr. 26 Zkušební lis LabTest 6.250 od firmy LaborTech [26]



Obr. 27 Ústředna Quantum X od firmy HBM [27]

4.3.1 Zatížení bodem na střed

Před započítím zatěžování bylo nutné desku důkladně vycentrovat, aby nedocházelo ke špatným výsledkům vlivem zatížení bodem (kuličkou) v jiném místě než ve středu desky (Obr. 28). Detailní uložení snímačů a zatěžovací kuličky je uvedeno na Obr. 29.

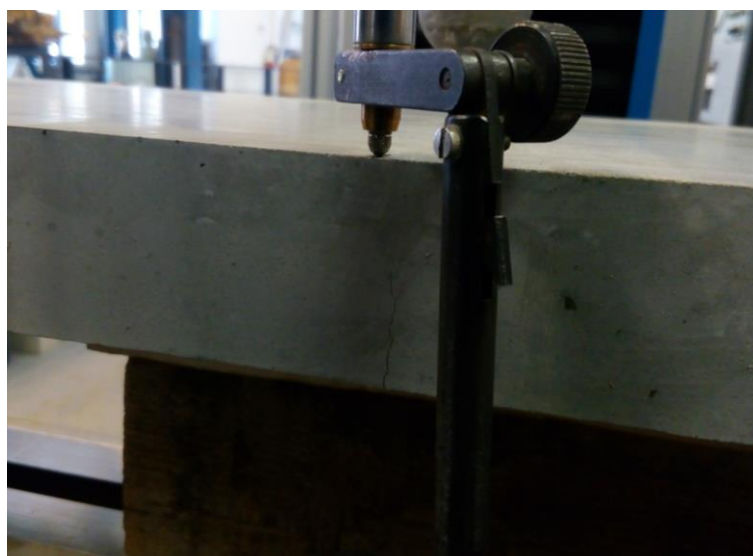


Obr. 28 Uložení desky z prostého SCC v lisu se snímači

Zkouška probíhala podle postupu uvedeného v teoretické části v podkapitole 3.4.2. Při zatěžování prostého SCC se předpokládal křehký lom betonu (Obr. 30), který už nepřenesl žádné zatížení.

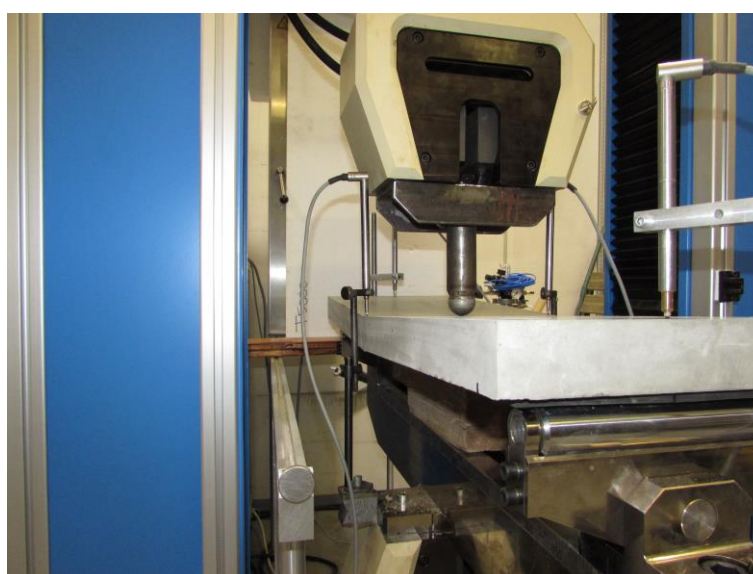


Obr. 29 Detail uložení snímačů a bodu (kuličky)



Obr. 30 Prostý SCC porušený trhlinou

Naopak u SCC vyztuženého vlákny se přepokládalo, že beton po porušení maximální silou bude schopen přenést částečné zatížení, a tak se pokračovalo se zatěžováním desky až do dosažení 20 mm průhybu desky (Obr. 31).

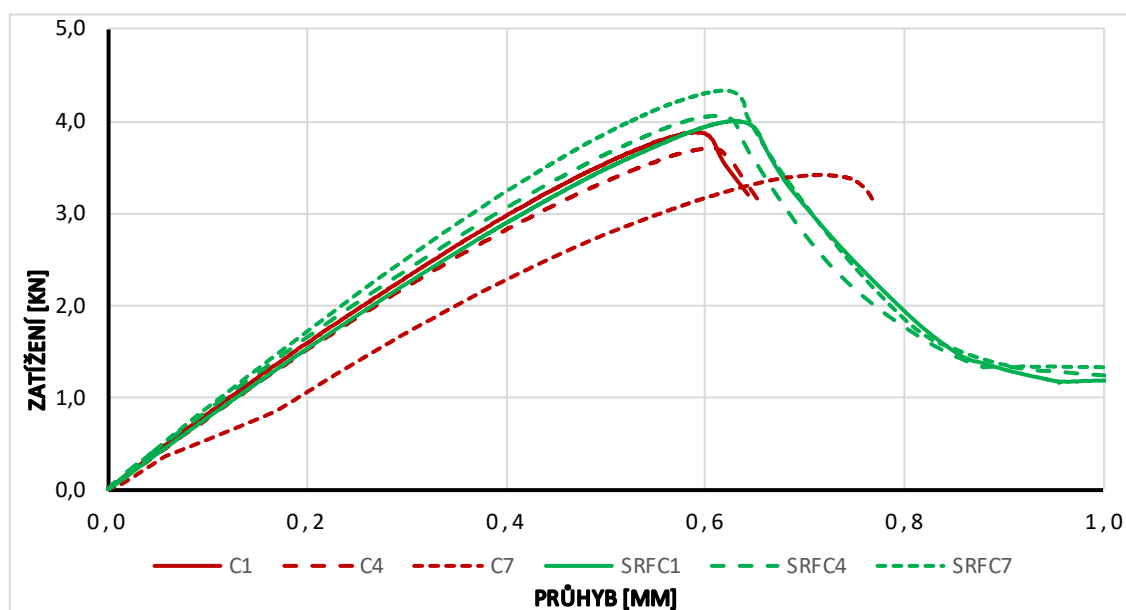


Obr. 31 Porušený vláknobeton při průhybu 20 mm

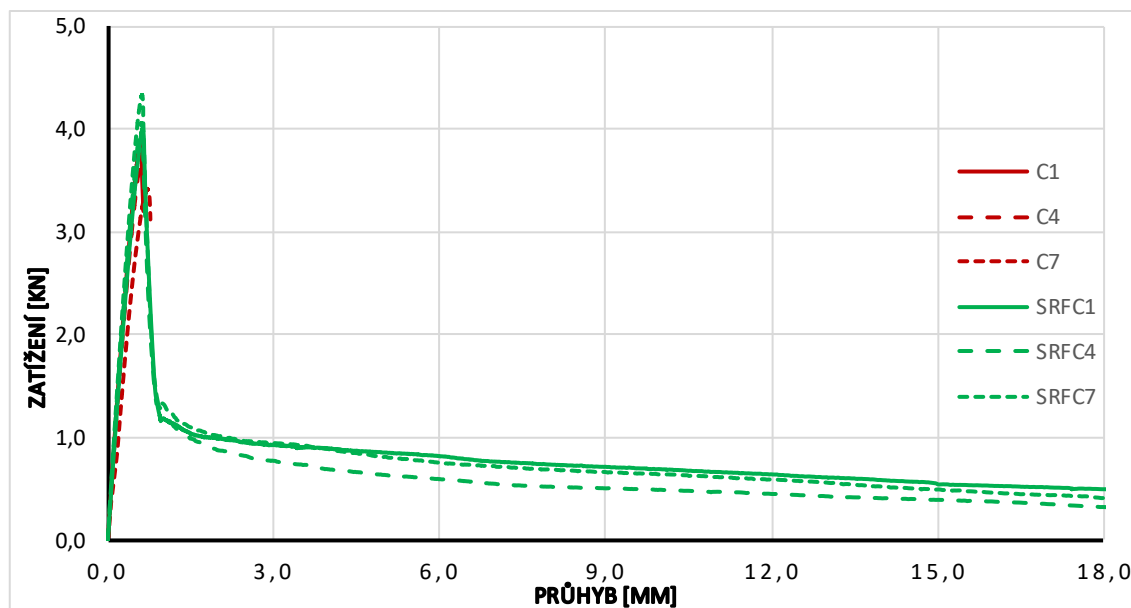
Vláknobeton porušený trhlinou a průběh jejího rozšiřování při dalším zatěžování je uveden v příloze na Obr. P.1. Po porušení betonu se zaznamenala nejvyšší síla, která beton porušila a dále se použila při výpočtu pevnosti betonu v tahu ohybem pomocí vzorce (6) uvedeného v teoretické části. Vypočítané pevnosti betonu v tahu ohybem jsou uvedeny v Tab. 5. V Grafu 2 jsou uvedeny průběhy zatížení do porušení betonu při průhybu 1 mm. Jednotlivé chování betonových desek při zatížení, zejména přenos zatížení po porušení je uveden v Grafu 3. Naměřené hodnoty zatížení a rozměrů desek jsou uvedeny v příloze Tab. N.H.4.

Tab. 5 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí zatížení bodu na střed

Druh betonu	f_{cf} [MPa]	Druh betonu	f_{cf} [MPa]
C1	7,0	SRFC1	7,2
C4	6,9	SRFC4	6,9
C7	6,3	SRFC7	7,2
Průměr	6,7	Průměr	7,1
Výb. směr. odchylka	0,34	Výb. směr. odchylka	0,16



Graf 2 Deformační diagram desek zatížených bodem na střed do průhybu 1 mm



Graf 3 Deformační diagram desek zatížených bodem na střed

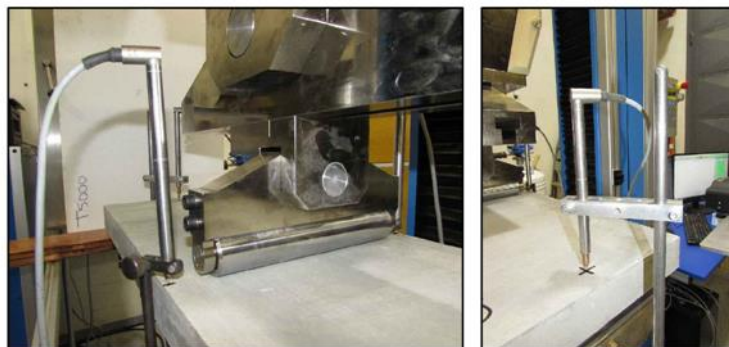
4.3.2 Zatížení linií na střed

Stejně jako u zatížení bodem, tak zkouška linií, tedy tříbodovým ohybem začala důkladným vycentrováním desky, aby zatěžovací váleček (linie) působil na střed desky (Obr. 32), nesmí se také zapomenout na uložení snímačů, které se ukládaly do stejných míst jako při zkoušce ohybem pomocí válečku (Obr. 33).



Obr. 32 Deska z prostého SCC a její uložení při zkoušce linií v tahu ohybem

Průběh a předpoklady zkoušky byly stejné jako u předešlého zatížení bodem na střed, kterými bylo křehké porušení u prostého SCC uprostřed pod zatěžovacím válečkem. Předpoklad křehkého lomu byl splněn ve všech třech případech desek, s rozdílem toho, že deska C5 se porušila výrazně mimo zatěžovací váleček (Obr. 34).



Obr. 33 Uložení snímačů a zatěžovacího válečku

Desky z vláknobetonu svůj předpoklad také splnily, kterým bylo porušení betonu a následné přenesení zatížení až do průhybu 20 mm. V přílohách je dále uveden příklad rozšiřování trhliny vláknobetonu po jeho porušení a následným přitěžováním Obr. P.2.

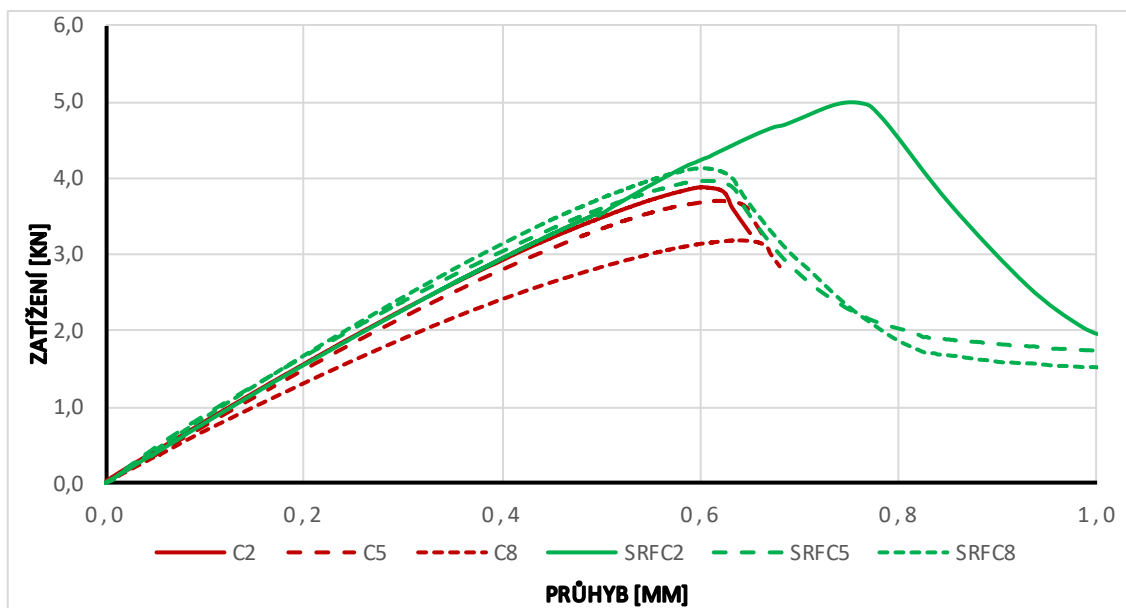


Obr. 34 Deska C5 porušená křehkým lomem mimo zatěžovací váleček (poloha válečku je vyznačena červenou linií)

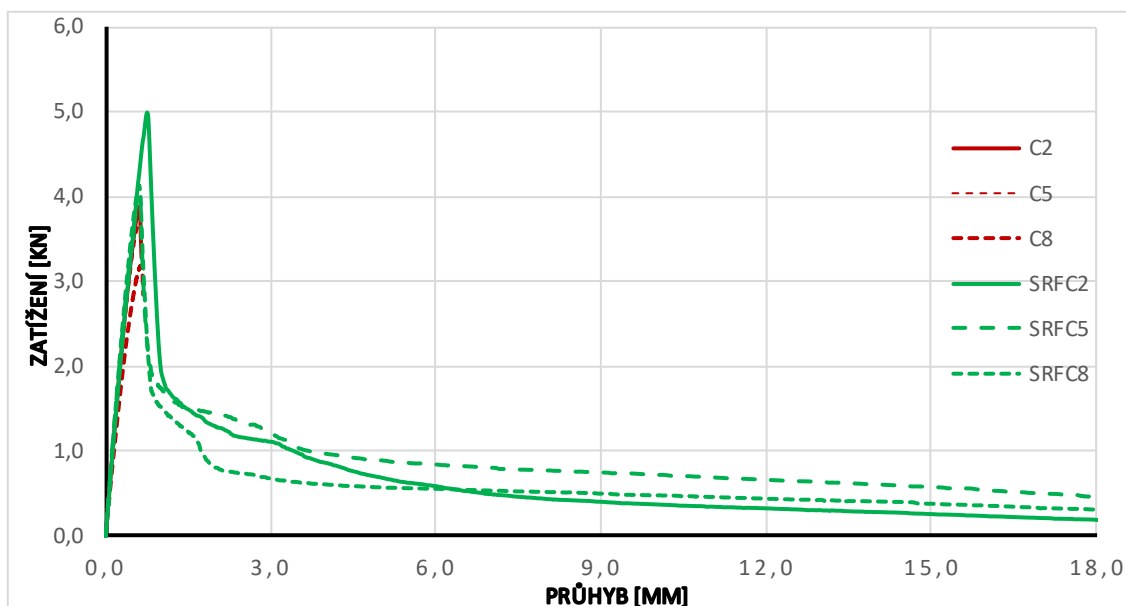
Výsledkem této zkoušky bylo stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem podle vzorce (6) z teoretické části, do kterého vstupovala maximální naměřená síla a další veličiny uvedené v příloze Tab. N.H.4. Vypočítané pevnosti v tahu ohybem jsou uvedeny v Tab. 6. Graf 4 ukazuje průběh zatížení do průhybu 1 mm. Průběh zatěžování a chování desek po jejich porušení je uvedeno v Grafu 5.

Tab. 6 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí tříbodové zkoušky

Druh betonu	f_{cf} [MPa]	Druh betonu	f_{cf} [MPa]
C2	6,9	SRFC2	8,9
C5	6,6	SRFC5	7,1
C8	5,9	SRFC8	6,7
Průměr	6,5	Průměr	7,6
Výb. směr. odchylka	0,50	Výb. směr. odchylka	1,18



Graf 4 Deformační diagram desek zatížených válečkem do průhybu 1 mm



Graf 5 Deformační diagram desek zatížených válečkem

4.3.3 Zatížení kruhovou deskou na střed

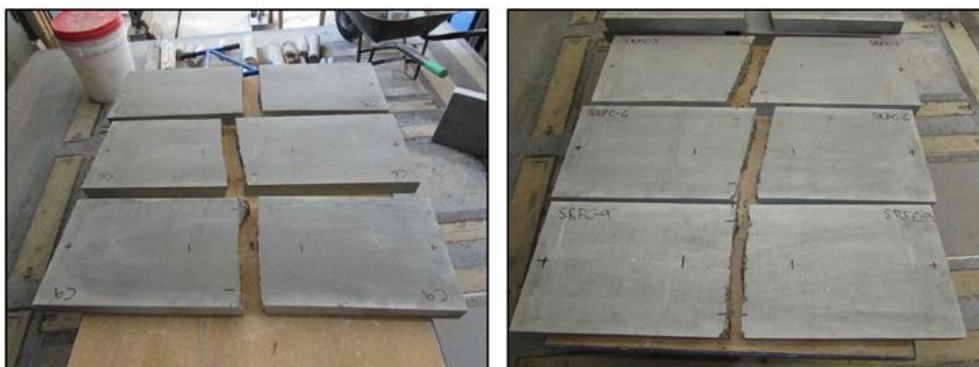
Zkouška zatížením kruhovou deskou probíhala stejně jako předešlé dvě zkoušky podle kapitoly 3.4.2 s malým rozdílem, kdy se na vycentrovanou desku se snímači položila podložka z hobry o průměru větším o 5 mm než průměr zatěžovací kruhové desky (Obr. 35). Podložka z hobry má za úkol roznést při průhybu betonové desky zatížení na celou plochu zatěžovací kruhové desky. Kruhová deska působí jako spojitě zatížení, ale při začínajícím průhybu desky je zatížení nejednoznačné (proto byla použita deska z hobry zajišťující spojitě zatížení). Při větším průhybu deska působí ve dvou bodech – čtyřbodový ohyb. Otázkou je, jak tedy jednoduše počítat výslednou pevnost (bez použití specializovaných

softwarů, což není předmětem řešení bakalářské práce). Proto byly zvoleny tři „typy“ zatížení, kterými jsou tříbodový ohyb, čtyřbodový ohyb a spojitě zatížení deskou.



Obr. 35 Uložení kruhové desky na podložce z hobry a snímačů na desce z SCC

Jak už bylo uvedeno v předešlých dvou podkapitolách, tak i u této zkoušky se předpokládal křehký lom u desek z prostého SCC, který se naplnil. U desek z vláknobetonu se taktéž splnil předpoklad uvedený v předešlých podkapitolách a desky i po porušení dokázaly přenést částečné zatížení. Průběh rozšiřování trhliny u vláknobetonu při dalším zatížení je vyobrazen v příloze Obr. P.3. Dalším předpokladem u obou druhů desek bylo porušení betonu v libovolném místě pod zatěžovací deskou, nikoli přímo uprostřed desky, což je vidět na Obr.36.

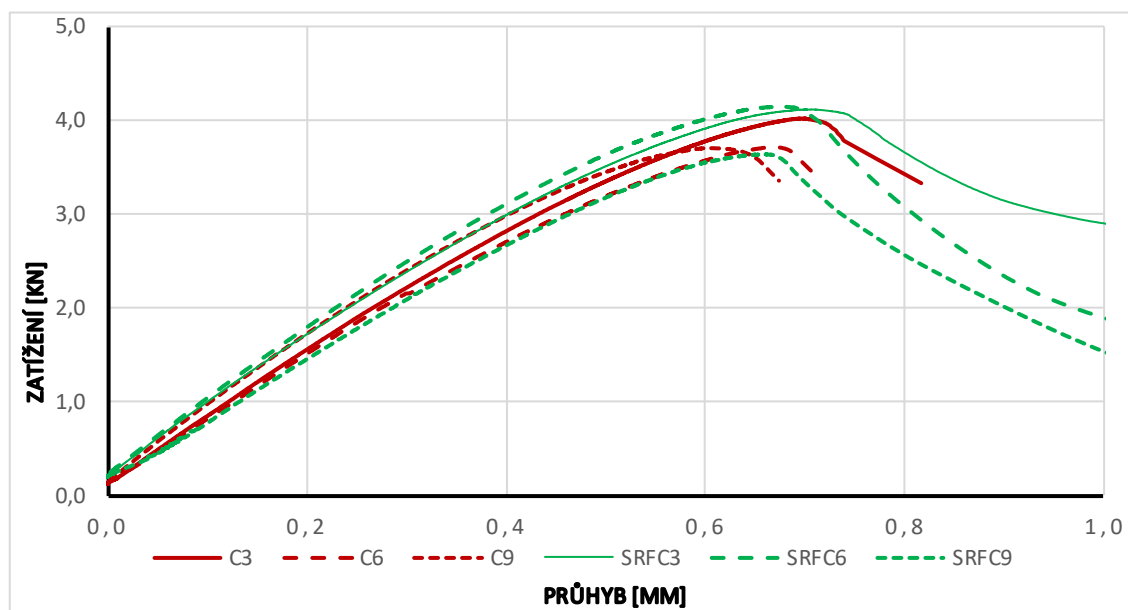


Obr. 36 Porušené desky z prostého SCC a vláknobetonu

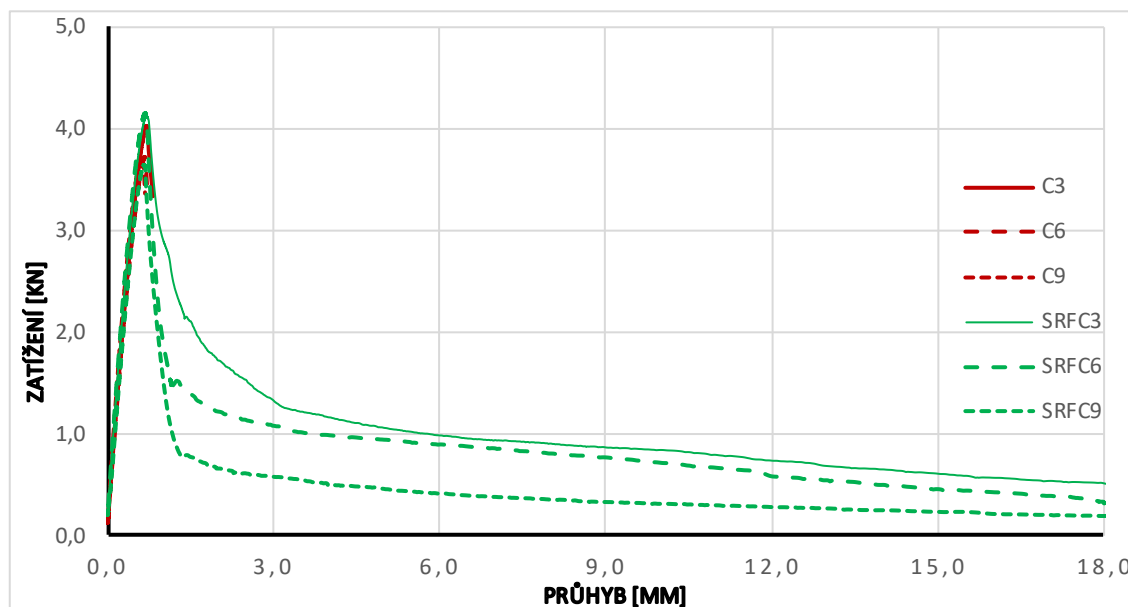
Zaznamenaná maximální síla ze zatěžovací zkoušky se opět spolu s naměřenými hodnotami použily pro výpočet pevnosti v tahu ohybem. Hodnoty z měření jsou uvedeny v příloze Tab. N.H.4 a výsledky pevností v tahu ohybem v tabulce Tab. 7. Detailní průběh zatížení do průhybu 1 mm je uveden Grafu 6. Chování jednotlivých desek při zatěžování je uvedeno v Grafu 7.

Tab. 7 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí kruhové desky

Druh betonu	3-bodový	4-bodový	Spojité	Druh betonu	3-bodový	4-bodový	Spojité
C3	7,3	5,6	6,1	SRFC3	7,4	5,6	6,2
C6	7,0	5,3	5,8	SRFC6	7,2	5,5	6,0
C9	6,4	4,9	5,3	SRFC9	6,7	5,1	5,6
Průměr	6,9	5,3	5,8	Průměr	7,1	5,4	6,0
Výb. směr. odchylka	0,47	0,36	0,39	Výb. směr. odchylka	0,35	0,26	0,29



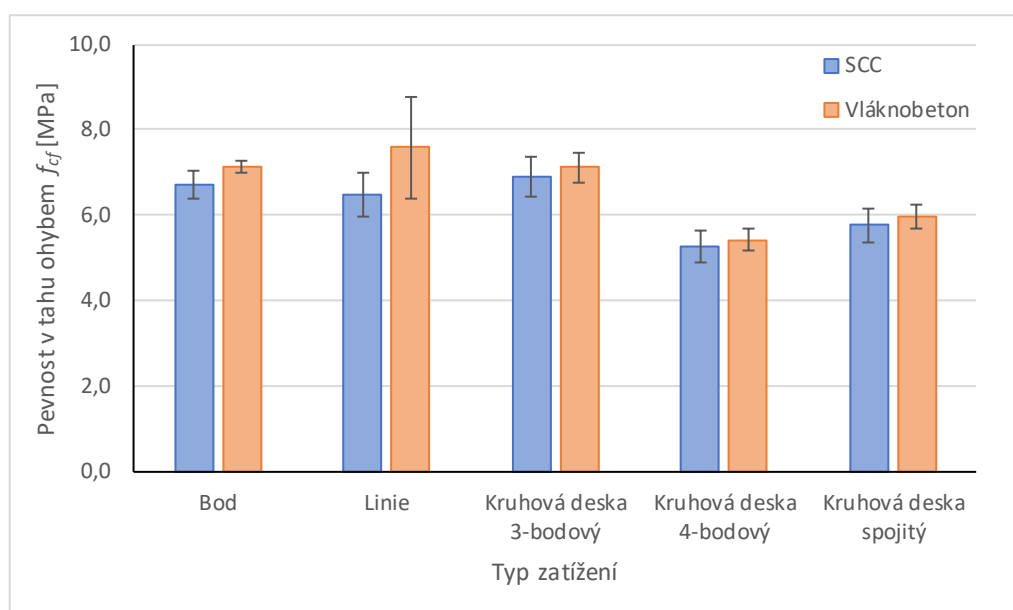
Graf 6 Deformační diagram desek zatížených kruhovou deskou do průhybu 1 mm



Graf 7 Deformační diagram desek zatížených kruhovou deskou

4.3.4 Diskuze provedených typů zatížení desek

Vyhodnocením zkoušek se stanovila pevnost v tahu ohybem desek zatížených bodem na střed 6,7 MPa u prostého SCC a 7,1 MPa u vláknobetonu, desky zatížené linií (válečkem) 6,5 MPa u prostého SCC a 7,6 MPa vláknobetonu. Je nutno říci, že zkouška kruhovou deskou byla vyhodnocena třemi typy výpočtu, kterými byl třibodový ohyb, čtyřbodový ohyb a spojitě zatížení od kruhové desky, jde o zjednodušení složitějšího reálného chování – pro potřeby bakalářské práce dostačující. V Grafu 8 jsou vidět porovnané pevnosti v tahu ohybem všech typů zatížení, a je možné říci, že zatížení kruhové desky čtyřbodovým ohybem a spojitým zatížením se liší od pevností linií a bodem. Do výpočtu statistické analýzy vstupovala tedy pevnost v tahu ohybem kruhovou deskou zatíženou třibodovým ohybem s průměrnou hodnotou 6,9 MPa pro prostý SCC a 7,1 MPa pro vláknobeton.

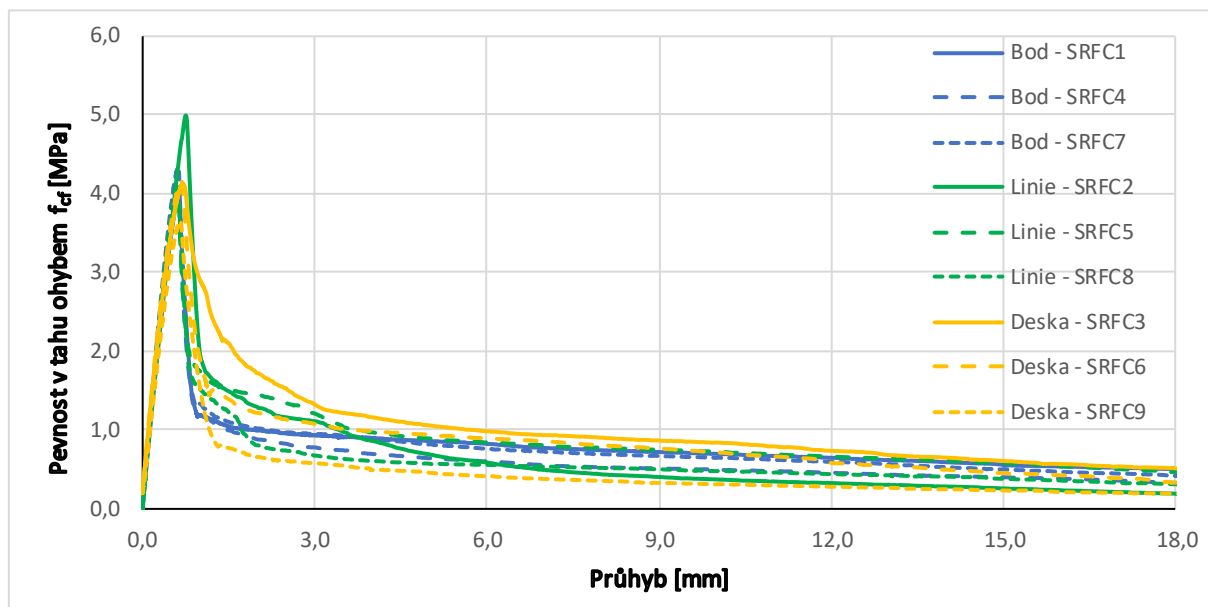


Graf 8 Porovnání stanovených pevností v tahu ohybem různým typem zatížení

Podle statistické analýzy lze říci, že pevnosti zkoušených druhů betonů s různými typy zatížení se od sebe statisticky neliší na hodnotě významnosti 0,05 (při porovnání prostého SCC a vláknobetonu zatíženého bodem byla vypočtena p-hodnota = 0,202; u prostého SCC a vláknobetonu zatíženého linií byla p-hodnota = 0,211; u prostého SCC a vláknobetonu zatíženého deskou byla p-hodnota = 0,584; u prostého SCC zatíženého bodem, linií a deskou byla p-hodnota = 0,534; u vláknobetonu zatíženého bodem, linií a deskou byla p-hodnota = 0,671). Chování betonových desek se liší pouze po dosažení maximální síly, tedy reziduální pevností, která byla stanovena podle normy ČSN P 732452 [28]. Výpočet reziduální pevnosti byl proveden zjednodušeně, protože uváděné vzorce v normě platí pro čtyřbodový ohyb trámů 150 x 150 x 700 mm. Průběh zatěžování všech desek z vláknobetonu po jejich porušení je vidět v Grafu 9. Výsledné hodnoty reziduálních pevností se opět statisticky významně nelišily na hladině významnosti 0,05 a jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8 Reziduální pevnosti vláknobetonu při průhybu 1,0 mm a 3,5 mm

Zatížení bodem	$f_{fc,tk,1,0}$ [MPa]	$f_{fc,tk,3,5}$ [MPa]	Zatížení linií	$f_{fc,tk,1,0}$ [MPa]	$f_{fc,tk,3,5}$ [MPa]	Spojité zatížení	$f_{fc,tk,1,0}$ [MPa]	$f_{fc,tk,3,5}$ [MPa]
SRFC1	2,1	1,6	SRFC2	2,2	1,3	SRFC3	2,4	1,7
SRFC4	3,3	1,7	SRFC5	3,1	1,8	SRFC6	2,6	1,1
SRFC7	4,9	2,0	SRFC8	3,1	1,6	SRFC9	3,3	1,0
Průměr	3,4	1,8	Průměr	2,8	1,6	Průměr	2,8	1,3
Výb. směr. odchylka	1,37	0,22	Výb. směr. odchylka	0,51	0,27	Výb. směr. odchylka	0,46	0,36



Graf 9 Deformační diagram desek z vláknobetonu porušených maximální silou

5 Závěr

Bakalářská práce byla v souladu se zadáním zaměřena na základní informace betonu, problematiku samozhutnitelných betonů a vláknobetonů. Cílem práce je porovnat vybrané charakteristiky samozhutnitelného betonu bez vláken a s vlákny. V teoretické části se práce zabývá vybranými charakteristikami a možnosti jejich stanovení pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek.

V praktické části šlo především o popis a vyhodnocení experimentu, který se zabýval zkoušením a porovnáním vybraných charakteristik prostého SCC a vláknobetonu s použitím ocelových vláken. Zkoušením a vyhodnocením trámů byly stanoveny poměrně vysoké pevnostní charakteristiky. Pevnost v tlaku dosahovala $f_c = 79,6$ MPa po 28 dnech a pevnost v tahu ohybem $f_{cf} = 8,0$ MPa po 28 dnech. Vysokých hodnot dosahoval také dynamický modul pružnosti, který nabýval hodnot $E_{cu} = 51,8$ GPa, $E_{crl} = 45,0$ GPa z podélného kmitání, $E_{crf} = 44,1$ GPa z příčného kmitání a $G_{cr} = 18,5$ GPa ve smyku. Naopak nízkých hodnot (vzhledem k ostatním vlastnostem) dosahoval statický modul pružnosti v tlaku $E_c = 32,2$ GPa, což způsobila zvolená frakce kameniva v receptuře betonu. Všechny uvedené moduly pružnosti beton vykazoval po 28 dnech od výroby zkušebních těles.

Práce se zabývala především chováním desek z prostého SCC a vláknobetonu, kdy se jednalo o porovnání různého typu zatížení desek a schopnosti toto zatížení přenést. Vyhodnocení zkoušených desek ukázalo velice příznivé (poměrně vysoké) ohybové pevnosti. Desky zatížené bodem na střed vykazovaly pevnost v tahu ohybem u prostého SCC $f_{cf} = 6,7$ MPa a $7,1$ MPa u vláknobetonu. V případě zatížení linií vláknobeton dosáhl nejvyšší průměrné pevnosti v tahu ohybem $f_{cf} = 7,6$ MPa, ale dosahoval nejnižší průměrné pevnosti v tahu ohybem $f_{cf} = 6,5$ MPa prostého SCC. Desky zatížené kruhovou deskou dosáhly stejné průměrné pevnosti v tahu ohybem $f_{cf} = 7,1$ MPa u vláknobetonu a dokonce dosáhly nejvyšší hodnoty $f_{cf} = 6,9$ MPa u prostého SCC. Ze statistického hlediska lze říci, že desky se svou pevností v tahu ohybem neliší, což potvrdil provedený dvouvýběrový t-test (nebo statistický test ANOVA) stanovených pevností. Velmi příznivou vlastnost vykazovaly desky z vláknobetonu, které po porušení maximální silou vykazovaly poměrně vysokou reziduální pevnost. Vláknobeton dosahoval reziduální pevnosti při průhybu $1,0$ mm $f_{fc,tk,1,0} = 2,8$ až $3,4$ MPa (v závislosti na způsobu zatížení) a při průhybu $3,5$ mm $f_{fc,tk,3,5} = 1,3$ až $1,8$ MPa (opět dle způsobu zatížení).

Celkovým zhodnocením lze říci, že betony vykazují poměrně vysoké ohybové pevnosti, a jako prvotní studie se provedené zkoušky ukázaly jako vhodné. Statistická analýza ukázala nedostatky vláknobetonu, u kterého se výsledné pevnosti téměř neliší od pevností SCC, a tak by bylo vhodné zapracovat na vývoji receptury zkoušeného vláknobetonu a provést další zkoušky, např. trvanlivostní vzhledem k případnému použití betonu pro výrobu zahradního nábytku, parkových laviček apod.

6 Seznam použitých zdrojů

6.1 Literatura

- [1] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] DE SCHUTTER, Geert, Peter J. M. BARTOS, Peter DOMONE a John GIBBS. *Samozhutnitelný beton*. 1. české vyd. Praha: ČBS, Česká betonářská společnost ČSSI, 2008. ISBN 978-80-87158-12-8.
- [3] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Beton*. Brno, 2004.
- [4] ČSN EN 206 + A1: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 1. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [5] ADÁMEK, Jiří. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul BI01: Stavební látky - Maltoviny a kamenivo*. Brno, 2004.
- [6] HELA, Rudolf. *Studijní opora pro kombinované studium - Modul M01: Technologie betonu I*. Brno, 2005.
- [7] ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 1. Praha: ČNMZ, 2009.
- [8] ČSN EN 12350-8: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím*. 1. Praha: ČNMZ, 2010.
- [9] ČSN EN 12350-9: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 9: Samozhutnitelný beton - Zkouška V-nálevkou*. 1. Praha: ČNMZ, 2010.
- [10] ČSN EN 12350-10: *Zkouška čerstvého betonu - Část 10: Samozhutnitelný beton - Zkouška L-truhlíkem*. 1. Praha: ČNMZ, 2010.
- [11] ČSN EN 12350-11: *Zkouška čerstvého betonu - Část 11: Samozhutnitelný beton - Zkouška segregace při prosévání*. 1. Praha: ČNMZ, 2010.
- [12] ČSN EN 12350-12: *Zkouška čerstvého betonu - Část 12: Samozhutnitelný beton - Zkouška J-kroužkem*. 1. Praha: ČNMZ, 2010.
- [13] ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 1. Praha: ČNMZ, 2009.
- [14] ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 1. Praha: ČNMZ, 2009.

- [15] ČSN ISO 1920-10: Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku. 1. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [16] ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. 1. Praha: ČNMZ, 2011.
- [17] ČSN 73 1372: Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. 1. Praha: ČNMZ, 2012.
- [18] HELA, Rudolf. *Studijní opora pro kombinované studium -Modul M01: Technologie betonu II*. Brno, 2007.
- [19] HELA, Rudolf. *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů: Problems of fresh self-compacting concrete : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-4199-6.
- [20] FIALA, Ctislav. *Samozhutnitelný beton vyztužený vlákny: Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete*. 1. Praha, 2006.
- [21] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-86364-00-3.
- [22] ČSN EN 12390-1: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. 1. Praha: ČNMZ, 2013.
- [23] Testers. In: <https://www.formtest.de/en/Products/Testers/LD-DD1-2.php> [online]. b.r. [cit. 2019-05-20].
- [24] ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti. 1. Praha: ČNMZ, 2016.
- [25] Indukčnostní snímač dráhy WA20. In: <https://www.hbm.cz/produkty/snimace-drahy/wa/> [online]. b.r. [cit. 2019-05-20].
- [26] LabTest 6.250. In: <http://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-systemy/staticke-elektromechanicke-zkusebni-stroje/> [online]. b.r. [cit. 2019-05-16].
- [27] Quantum X: ústředna. In: <https://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal-amplifier/> [online]. b.r. [cit. 2019-05-16].
- [28] ČSN P 73 2452: Vláknobeton - Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. 1. Praha: ČNMZ, 2015.

6.2 Použité obrázky

Obr. 1 Křivka zrnitosti podle Bolomeyovy a Fülleroovy rovnice [1]	16
Obr. 2 Znázornění segregace betonu [1]	18
Obr. 3 Diagram tečení Newtonovské a Binghamské viskózní kapaliny [2]	20
Obr. 4 Krychelná pevnost v tlaku ve srovnání s ekvivalentem vodního součinitele [2]	22
Obr. 5 Modul pružnosti ve srovnání s pevností v tlaku [2]	23
Obr. 6 Poměr nepřímé pevnosti v tahu k pevnosti v tlaku [2]	23
Obr. 7 Deformační diagram v tlaku drátkobetonu F a tradičního betonu B [21]	25
Obr. 8 Deformační diagram v tahu drátkobetonu F a tradičního betonu B [21]	25
Obr. 9 Vhodné způsoby porušení zkušebních krychlí	26
Obr. 10 Nevhovující způsoby porušení zkušebních krychlí	26
Obr. 11 Uspořádání zatěžování při čtyřbodovém ohybu	27
Obr. 12 Uspořádání zatížení při třibodovém ohybu	28
Obr. 13 Poloha sond při podélném kmitání	31
Obr. 14 Uspořádání sond při příčném kmitání	31
Obr. 15 Uspořádání sond při kroutivém kmitání	32
Obr. 16 Použité složky při výrobě betonů	34
Obr. 17 Formy pro výrobu těles: vlevo nahoře pro trámce a uprostřed pro výrobu desek	36
Obr. 18 Ukázka odformování A a uložení těles v ošetřovací nádobě B	36
Obr. 19 Ultrazvukový přístroj Pundit PL-200 od společnosti Proceq	38
Obr. 20 Měření rezonanční metodou	39
Obr. 21 Zatěžovací lis DELTA 6-300 od firmy FORM+TEST	39
Obr. 22 Zkušební těleso porušené tlakovou silou	40
Obr. 23 Přístroj LabTest 6.30 od firmy LaborTech	42
Obr. 24 Porušení tělesa ohybovou trhlinou	43
Obr. 25 Těleso porušené tlakovou silou	43
Obr. 26 Zkušební lis LabTest 6.250 od firmy LaborTech [26]	45
Obr. 27 Ústředna Quantum X od firmy HBM [27]	46
Obr. 28 Uložení desky z prostého SCC v lisu se snímači	46
Obr. 29 Detail uložení snímačů a bodu (kuličky)	47
Obr. 30 Prostý SCC porušený trhlinou	47
Obr. 31 Porušený vláknobeton při průhybu 20 mm	47
Obr. 32 Deska z prostého SCC a její uložení při zkoušce linií v tahu ohybem	49
Obr. 33 Uložení snímačů a zatěžovacího válečku	50

Obr. 34 Deska C5 porušená křehkým lomem mimo zatěžovací váleček (poloha válečku je vyznačena červenou linií)	50
Obr. 35 Uložení kruhové desky na podložce z hobry a snímačů na desce z SCC.....	52
Obr. 36 Porušené desky z prostého SCC a vláknobetonu	52

6.3 Použité tabulky

Tab. 1 Vypočítané pružné a přetvárné charakteristiky po 28 dnech.....	40
Tab. 2 Vypočítané pružné a přetvárné charakteristiky po 7 dnech	41
Tab. 3 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem po 7 a 28 dnech	43
Tab. 4 Vypočítané pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech.....	44
Tab. 5 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí zatížení bodu na střed	48
Tab. 6 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí tříbodové zkoušky.....	50
Tab. 7 Vypočítané pevnosti v tahu ohybem pomocí kruhové desky.....	53
Tab. 8 Reziduální pevnosti vláknobetonu při průhybu 1,0 mm a 3,5 mm	55

6.4 Použité grafy

Graf 1 Porovnání modulů pružnosti	41
Graf 2 Deformační diagram desek zatížených bodem na střed do průhybu 1 mm	48
Graf 3 Deformační diagram desek zatížených bodem na střed	49
Graf 4 Deformační diagram desek zatížených válečkem do průhybu 1 mm.....	51
Graf 5 Deformační diagram desek zatížených válečkem.....	51
Graf 6 Deformační diagram desek zatížených kruhovou deskou do průhybu 1 mm	53
Graf 7 Deformační diagram desek zatížených kruhovou deskou	53
Graf 8 Porovnání stanovených pevností v tahu ohybem různým typem zatížení.....	54
Graf 9 Deformační diagram desek z vláknobetonu porušených maximální silou	55

7 Seznam symbolů

w	vodní součinitel [-]
v	množství vody v čerstvém betonu [kg]
c	množství cementu v čerstvém betonu [kg]
P	propad sítem o velikosti otvoru d
D_{max}	velikost maximálního zrna kameniva
A	součinitel požadované zpracovatelnosti
f_c	pevnost v tlaku [MPa, N/mm ²]
F	maximální zatížení při porušení [N]
A_c	průřezová plocha zkušebního tělesa [mm ²]
f_{cf}	pevnost v tahu ohybem [MPa, N/mm ²]
l	vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]
d_1 a d_2	rozměry příčného řezu tělesa [mm]
σ_a	horní zatěžovací napětí [MPa, N/mm ²]
σ_b	základní napětí [MPa, N/mm ²]
ε_a	průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí
ε_b	průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí
E_c	statický modul pružnosti v tlaku [MPa]
v_L	rychlost impulzu [km/s]
L	délka měřicí základny [mm]
T	čas včetně t_{kor} , který uplyne při impulzu měřicí základnou, tj. $T = T_L \pm t_{kor}$
t_{kor}	korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a rozdílu času šíření UZ vln
E_{cu}	dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]
ρ	objemová hmotnost betonu [kg/m ³]
v_L	impulzová rychlost podélného UZ vlnění [km/s]
v_{L3}	impulzová rychlost UZ podélných vln v trojrozměrném prostředí [km/s]
E_{crL}	dynamický modul pružnosti betonu z vlastního kmitočtu podélného kmitání [MPa]
f_L	první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa
E_{crf}	dynamický modul pružnosti betonu z vlastního kmitočtu příčného kmitání [MPa]
c_1	je korekční součinitel, který zahrnuje vliv smyku a setrvačných momentů
f_f	první vlastní kmitočet příčného kmitání zkušebního tělesa [kHz]
i	poloměr setrvačnosti příčného řezu zkušebního tělesa [m]
f_t	první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušebního tělesa [kHz]
G_{cr}	dynamický modul pružnosti betonu ve smyku z vlastního kmitočtu kmitání [MPa]
ν_{cr}	dynamický Poissonův koeficient

8 Seznam příloh

Tabulky:

Tab. N.H. 1 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu modulu pružnosti pomocí UZ metody	63
Tab. N.H. 2 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu modulu pružnosti pomocí rezonanční metody	64
Tab. N.H. 3 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu pevností v tlaku a v tahu ohybem	64
Tab. N.H. 4 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu pevnosti v tahu ohybem desek	65

Grafy:

Graf P. 1 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku E_{cu} po 7 a 28 dnech	65
Graf P. 2 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu E_{crL} po 7 a 28 dnech	66
Graf P. 3 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu E_{crf} po 7 a 28 dnech	66
Graf P. 4 Porovnání dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr} po 7 a 28 dnech	67

Obrázky:

Obr. P. 1 a) Průběh šíření trhliny při zatěžování bodem na střed	68
Obr. P. 1 b) Průběh šíření trhliny při zatěžování bodem na střed	69
Obr. P. 2 a) Průběh šíření trhliny při liniovém zatěžování	69
Obr. P. 2 b) Průběh šíření trhliny při liniovém zatěžování	70
Obr. P. 3 a) Průběh šíření trhliny při zatěžování kruhovou deskou	71
Obr. P. 3 b) Průběh šíření trhliny při zatěžování kruhovou deskou	72

Přílohy:

Tab. N.H. 1 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu modulu pružnosti pomocí UZ metody

7 - DNÍ							
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	Délka L [mm]	Hmotnost m [g]	Ultrazvuk [μs]		
M1-1	40,38	39,94	160,04	617,10	33,5	33,4	33,5
M1-2	40,02	39,80	160,39	610,70	33,7	33,7	34,1
M1-3	40,89	39,95	160,33	628,26	33,3	33,8	33,8
M1-4	40,99	39,86	160,49	627,92	33,9	34,0	34,2
M1-5	40,75	40,10	160,84	628,06	33,7	33,9	34,2
M1-6	40,86	39,82	160,38	625,40	33,8	33,9	34,0
M2-1	40,35	39,94	160,42	621,84	33,8	33,9	34,1
M2-2	40,38	39,79	160,52	620,98	33,7	33,9	33,9
M2-3	40,58	39,87	160,33	624,74	33,9	34,0	34,0
M2-4	41,23	39,85	159,99	631,40	33,8	33,8	34,1
M2-5	40,75	40,12	160,34	628,14	33,8	33,9	33,8
M2-6	40,93	39,86	160,19	624,30	34,0	34,4	34,6
M3-1	39,91	39,94	160,23	614,54	33,9	34,0	34,1
M3-2	40,42	39,83	160,50	616,90	33,9	33,9	34,2
M3-3	41,27	39,96	160,38	635,38	33,7	34,0	34,2
M3-4	40,33	39,92	160,08	620,56	33,8	33,9	33,9
M3-5	39,94	39,89	160,40	610,42	34,2	34,2	34,0
M3-6	40,34	40,09	160,25	621,94	34,1	34,4	33,9
28 - DNÍ							
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	Délka L [mm]	Hmotnost m [g]	Ultrazvuk [μs]		
M1-3	40,89	39,95	160,33	629,42	32,6	32,8	32,7
M1-4	40,99	39,86	160,49	629,24	32,5	32,6	32,6
M1-5	40,75	40,10	160,84	629,04	32,5	32,5	32,8
M1-6	40,86	39,82	160,38	625,88	32,6	32,6	32,6
M2-3	40,58	39,87	160,33	626,06	32,8	32,8	32,8
M2-4	41,23	39,85	159,99	632,48	32,5	32,7	32,7
M2-5	40,75	40,12	160,34	629,34	32,6	32,8	32,6
M2-6	40,93	39,86	160,19	625,52	32,8	32,9	33,0
M3-3	41,27	39,96	160,38	636,48	32,6	32,8	33,1
M3-4	40,33	39,92	160,08	621,74	32,7	32,8	32,5
M3-5	39,94	39,89	160,40	611,58	33,1	32,9	32,8
M3-6	40,34	40,09	160,25	623,00	33,0	33,2	32,8

Tab. N.H. 2 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu modulu pružnosti pomocí rezonanční metody

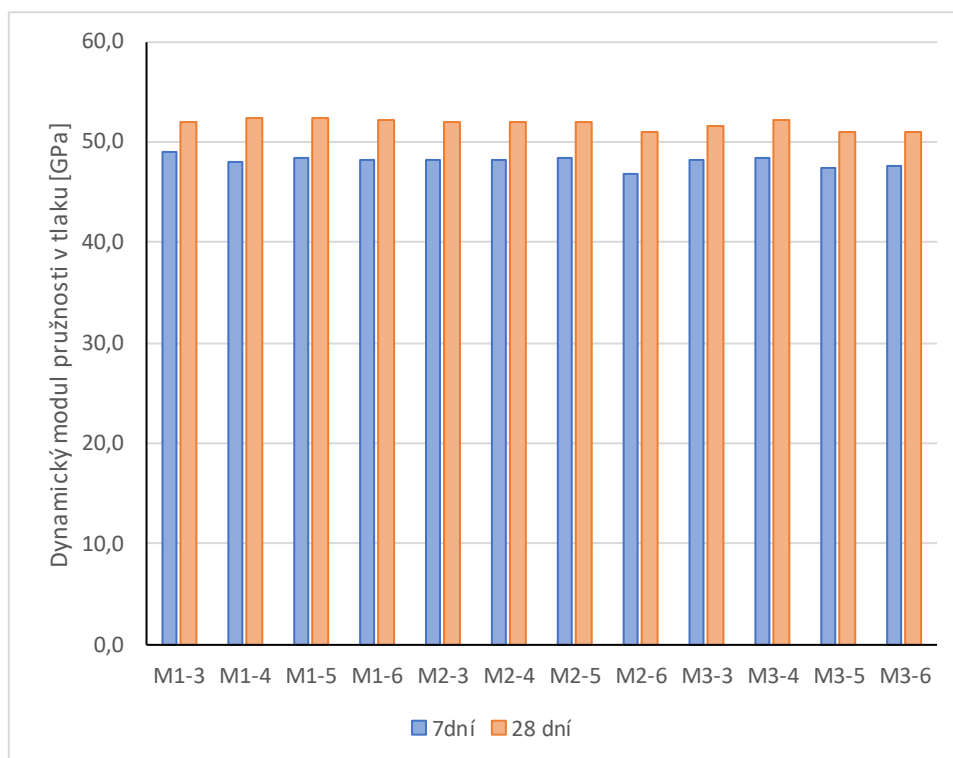
7 - DNÍ					Vlastní frekvence kmitání [Hz]		
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	Délka L [mm]	Hmotnost m [g]	podélná L	příčná f	torzní t
M1-1	40,38	39,94	160,04	617,10	13150	5641	7700
M1-2	40,02	39,80	160,39	610,70	13052	5678	7651
M1-3	40,89	39,95	160,33	628,26	13126	5740	7750
M1-4	40,99	39,86	160,49	627,92	13076	5678	7750
M1-5	40,75	40,10	160,84	628,06	13101	5727	7762
M1-6	40,86	39,82	160,38	625,40	13138	5666	7737
M2-1	40,35	39,94	160,42	621,84	13187	5703	7824
M2-2	40,38	39,79	160,52	620,98	13187	5641	7774
M2-3	40,58	39,87	160,33	624,74	13150	5678	7750
M2-4	41,23	39,85	159,99	631,40	13175	5691	7824
M2-5	40,75	40,12	160,34	628,14	13175	5752	7824
M2-6	40,93	39,86	160,19	624,30	13113	5715	7550
M3-1	39,91	39,94	160,23	614,54	13150	5654	7713
M3-2	40,42	39,83	160,50	616,90	13089	5617	7725
M3-3	41,27	39,96	160,38	635,38	13101	5666	7811
M3-4	40,33	39,92	160,08	620,56	13150	5691	7737
M3-5	39,94	39,89	160,40	610,42	13052	5666	7651
M3-6	40,34	40,09	160,25	621,94	13027	5703	7725
28 - DNÍ					Vlastní frekvence kmitání [Hz]		
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	Délka L [mm]	Hmotnost m [g]	podélná L	příčná f	torzní t
M1-3	40,89	39,95	160,33	629,42	13459	5910	7937
M1-4	40,99	39,86	160,49	629,24	13459	5962	7925
M1-5	40,75	40,10	160,84	629,04	13507	5886	7973
M1-6	40,86	39,82	160,38	625,88	13556	5862	7998
M2-3	40,58	39,87	160,33	626,06	13507	5898	7985
M2-4	41,23	39,85	159,99	632,48	13617	5898	8022
M2-5	40,75	40,12	160,34	629,34	13495	5922	8010
M2-6	40,93	39,86	160,19	625,52	13434	5874	7973
M3-3	41,27	39,96	160,38	636,48	13459	5850	7961
M3-4	40,33	39,92	160,08	621,74	13544	5874	7961
M3-5	39,94	39,89	160,40	611,58	13459	5825	7878
M3-6	40,34	40,09	160,25	623,00	13410	5862	7913

Tab. N.H. 3 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu pevností v tlaku a v tahu ohybem

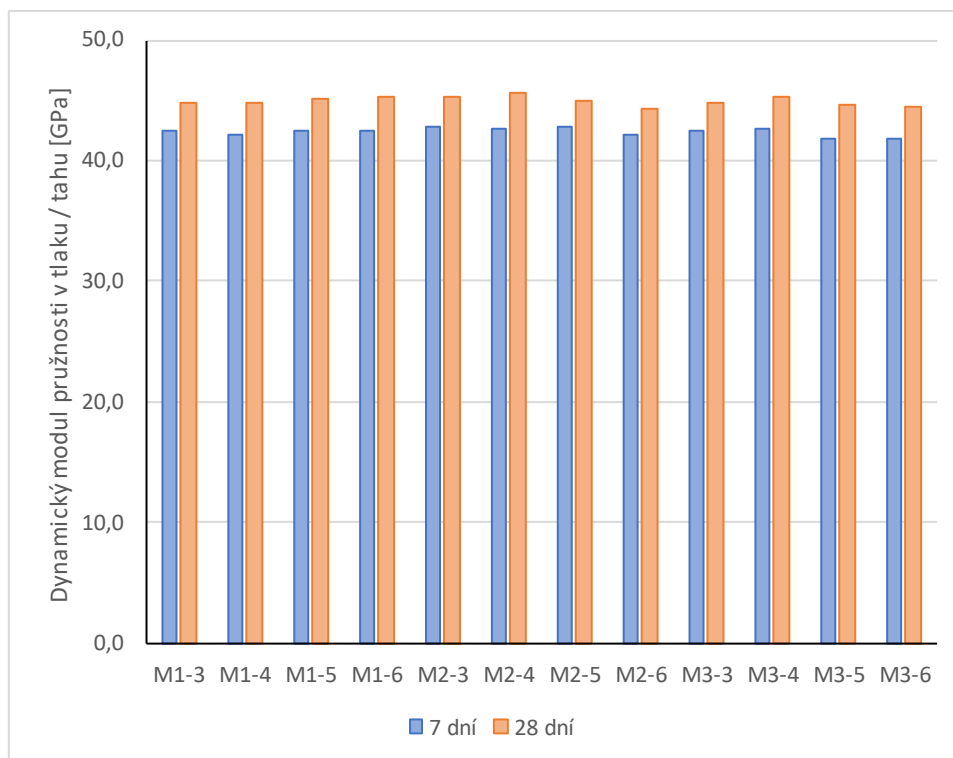
7 - DNÍ						
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	l [mm]	F-ohyb [N]	F-tlak [kN]	
M1-1	40,38	39,94	100	3364	111,27	102,46
M2-1	40,35	39,94	100	3450	114,17	114,74
M3-1	39,91	39,94	100	3462	111,37	111,54
28 - DNÍ						
Vzorek	Šířka b [mm]	Výška h [mm]	l [mm]	F-ohyb [N]	F-tlak [kN]	
M1-3	40,89	39,95	100	3358	134,1	130,71
M2-3	40,58	39,87	100	3871	124,94	126,68
M3-3	41,27	39,96	100	3249	128,28	117,85

Tab. N.H. 4 Naměřené hodnoty vstupující do výpočtu pevnosti v tahu ohybem desek

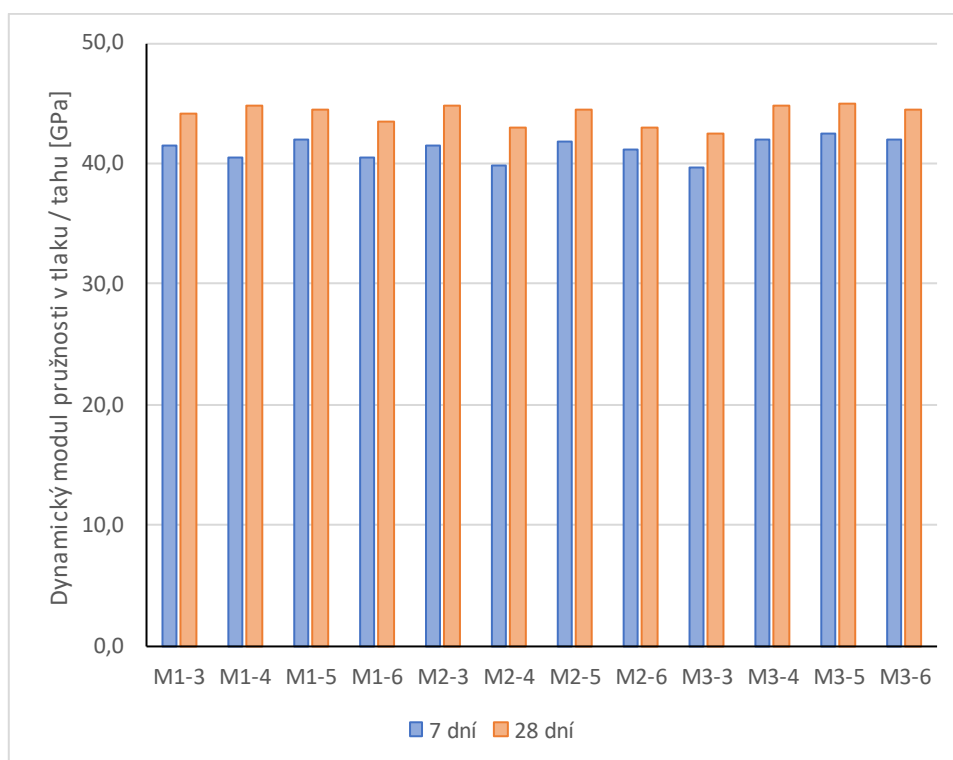
Deska	Způsob zatížení	Ab [mm]	ah [mm]	vzdálenost podpor [mm]	Maximální síla [N]
C1	kulička	298,20	48,52	840	3883
C2	3-bodový ohyb	299,51	48,63	840	3881
C3	kruhová deska	300,21	48,03	840	4024
C4	kulička	299,32	47,74	840	3713
C5	3-bodový ohyb	300,13	48,41	840	3703
C6	kruhová deska	299,18	47,38	840	3719
C7	kulička	299,50	47,69	840	3420
C8	3-bodový ohyb	299,18	47,57	840	3185
C9	kruhová deska	299,73	49,38	840	3707
SRFC1	kulička	299,55	48,39	840	4005
SRFC2	3-bodový ohyb	299,59	48,51	840	4995
SRFC3	kruhová deska	299,13	48,42	840	4121
SRFC4	kulička	299,49	49,59	840	4060
SRFC5	3-bodový ohyb	300,53	48,42	840	3964
SRFC6	kruhová deska	299,46	49,17	840	4150
SRFC7	kulička	299,90	50,15	840	4336
SRFC8	3-bodový ohyb	298,53	50,90	840	4130
SRFC9	kruhová deska	300,09	47,66	840	3641



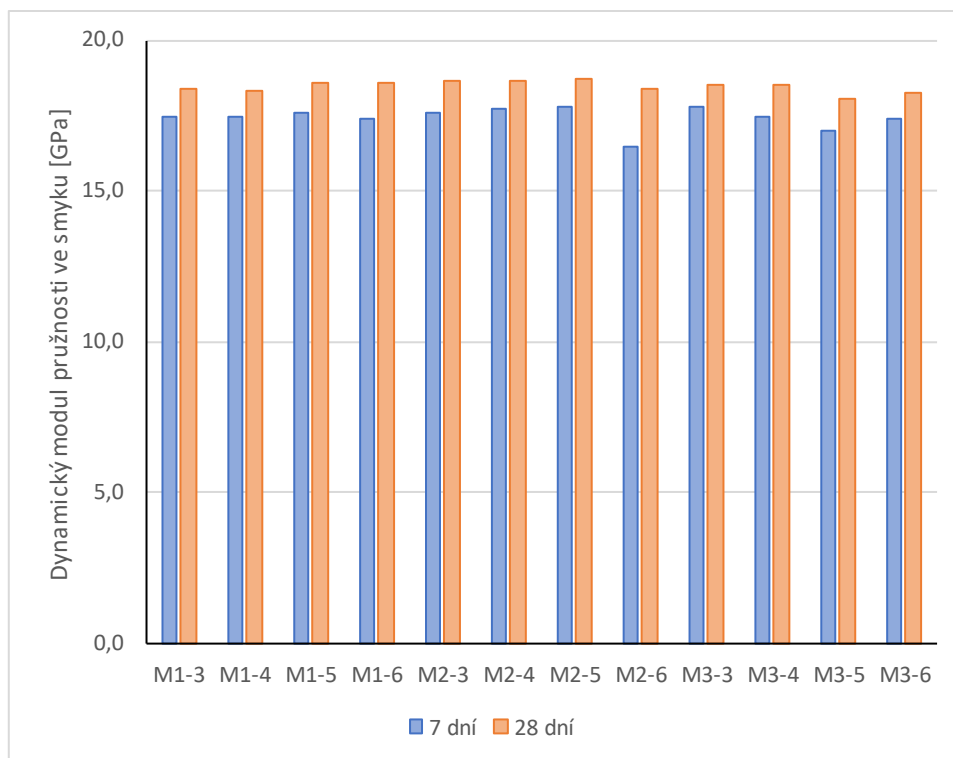
Graf P. 1 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku E_{cu} po 7 a 28 dnech



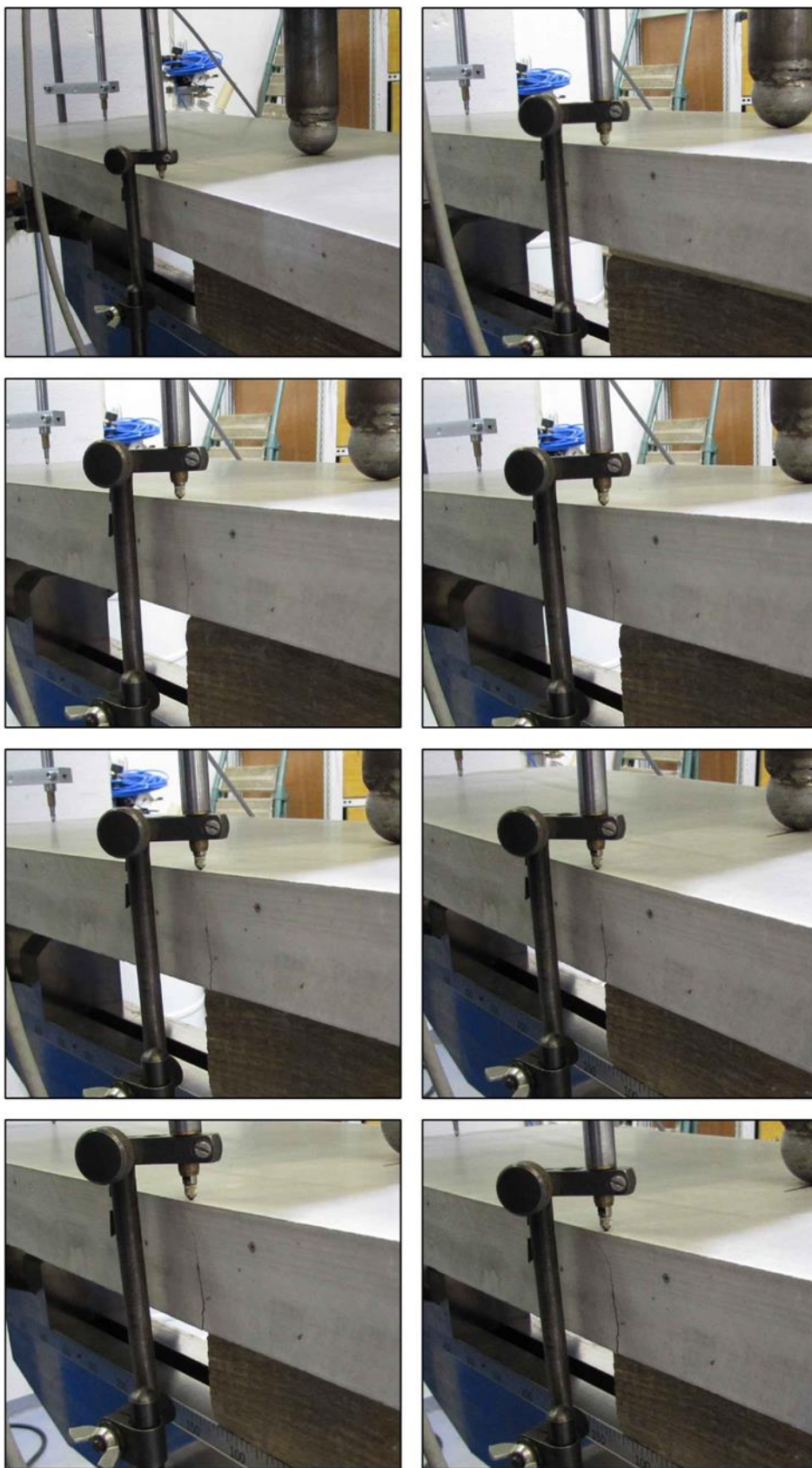
Graf P. 2 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu E_{crL} po 7 a 28 dnech



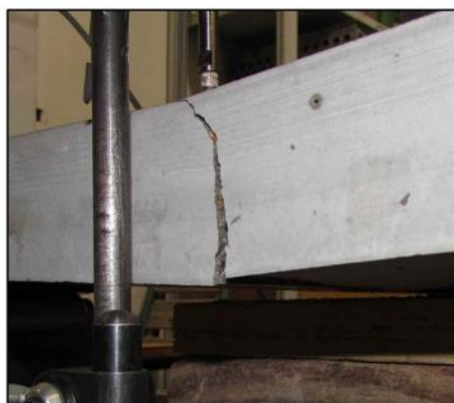
Graf P. 3 Porovnání dynamického modulu pružnosti v tlaku/tahu E_{crf} po 7 a 28 dnech



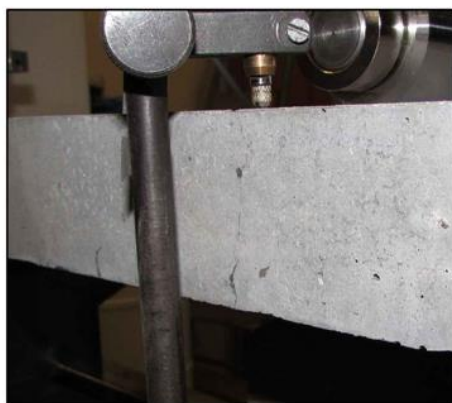
Graf P. 4 Porovnání dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr} po 7 a 28 dnech



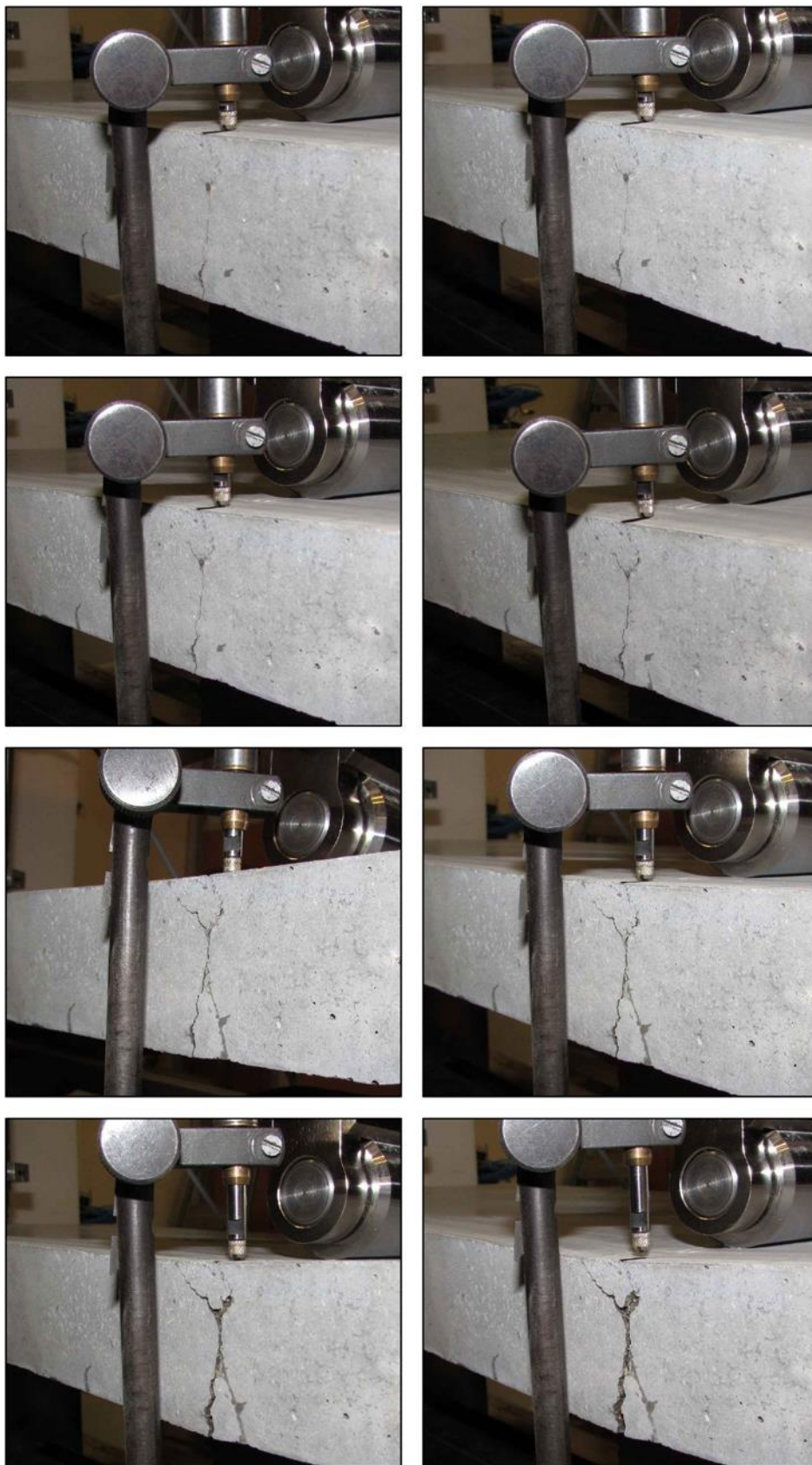
Obr. P. 1 a) Průběh šíření trhliny při zatěžování bodem na střed



Obr. P. 2 b) Průběh šíření trhliny při zatěžování bodem na střed



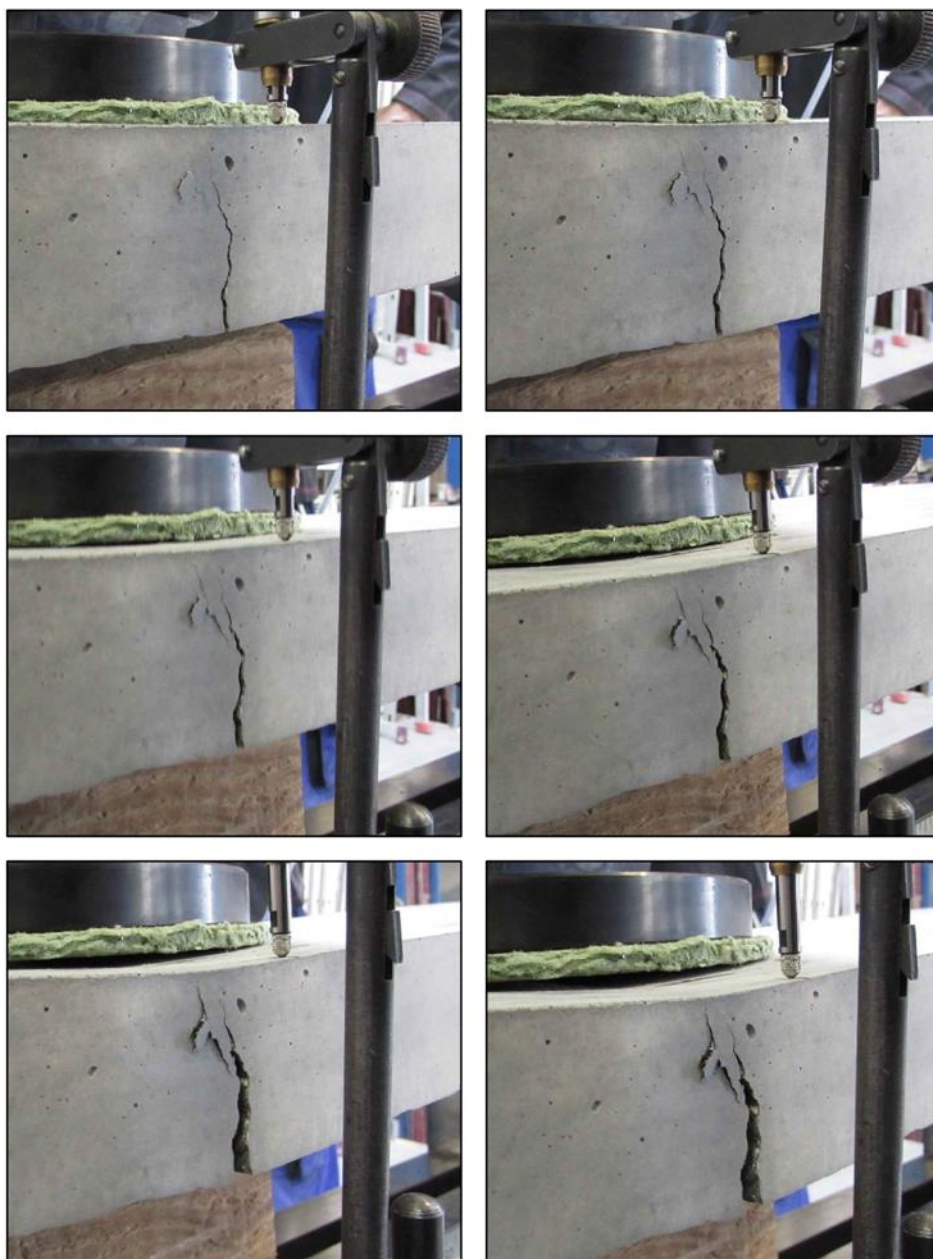
Obr. P. 3 a) Průběh šíření trhliny při liniovém zatěžování



Obr. P. 4 b) Průběh šíření trhliny při liniovém zatěžování



Obr. P. 5 a) Průběh šíření trhliny při zatěžování kruhovou deskou



Obr. P. 6 b) Průběh šíření trhliny při zatěžování kruhovou deskou